



Universitat de les
Illes Balears



Trabajo Fin de Grado

INGENIERÍA TELEMÁTICA

Cell-free Massive MIMO en sistemas 5G

LLORENÇ ROMÀ

Tutores

Guillem Femenias Nadal

Felip Riera-Palou

Escola Politècnica Superior
Universitat de les Illes Balears
Palma, 2 de julio de 2018

Quiero agradecer a Felip y a Guillem la gran ayuda que me han dado en todo momento
para realizar este trabajo.
A todos los profesores que he tenido y que me han aportado cosas buenas.
A toda mi familia que ha estado ahí en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

Índice general	iii
Índice de figuras	v
Índice de cuadros	vii
Acrónimos	ix
Resumen	xi
1 Introducción	1
1.1 Notación matemática	6
2 Cell Free Massive MIMO VS User Centric	7
2.1 Modelo de sistema	7
2.1.1 Modelo del canal	9
2.1.2 Fase de entrenamiento - <i>Uplink Training</i>	10
2.1.3 Transmisión de bajada - <i>Downlink</i>	12
2.1.4 Transmisión de subida - <i>Uplink</i>	16
3 Resultados	19
3.1 Parámetros del sistema	19
3.2 Resultados en función del número de usuarios en el sistema	20
3.2.1 Throughput	20
3.2.2 Capacidad de Fronthaul	23
3.3 Resultados en función de la duración de la fase de entrenamiento	27
3.3.1 Throughput	27
3.3.2 Capacidad de Fronthaul	28
3.4 Resultados en función del número de usuarios servidos	29
3.4.1 Throughput	29
3.4.2 Capacidad de Fronthaul	33
4 Conclusiones	35
Bibliografía	37

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Red celular con factor de reutilización frecuencial $U=3$	2
1.2	Ilustración de un sistema <i>Massive MIMO</i> celular.	3
1.3	Arquitectura <i>Cell Free Massive MIMO</i>	4
1.4	Sistema CF. Cada AP sirve a todas las MS del sistema.	4
1.5	Sistema UC. Ilustración de las MS a las que va a servir cada AP.	5
2.1	Fases del proceso de comunicación en una sistema que utiliza TDD.	8
2.2	Fases del proceso de comunicación en un sistema que utiliza FDD	8
3.1	<i>Throughput</i> medio por usuario en función del número de usuarios del sistema en el <i>downlink</i> en CF y UC.	21
3.2	<i>Throughput</i> medio por usuario en función del número de usuarios del sistema en el <i>downlink</i> asignando parcialmente secuencias ortogonales en CF y UC.	22
3.3	<i>Throughput</i> medio por usuario en función del número de usuarios del sistema en el <i>uplink</i> en CF y UC.	22
3.4	Función de distribución acumulada de la capacidad de <i>fronthaul</i> media necesaria por AP en CF y UC.	24
3.5	Capacidad de <i>fronthaul</i> media necesaria por AP en CF y en UC.	25
3.6	Función de distribución acumulada de la capacidad de <i>fronthaul</i> media necesaria por AP en UC y UC2.	26
3.7	Capacidad de <i>fronthaul</i> media necesaria por AP en UC y UC2.	26
3.8	<i>Throughput</i> medio por usuario en función de τ_p en CF y UC en el <i>downlink</i>	27
3.9	<i>Throughput</i> medio por usuario en función de τ_p en CF y UC en el <i>uplink</i>	29
3.10	Capacidad de <i>fronthaul</i> media necesaria por AP en función de τ_p en CF y UC.	29
3.11	Función de distribución acumulada del <i>throughput</i> medio por usuario en CF y UC en el <i>downlink</i>	30
3.12	<i>Throughput</i> medio por usuario en función de N en UC en <i>downlink</i>	31
3.13	Función de distribución acumulada del <i>throughput</i> medio por usuario en CF y UC en el <i>uplink</i>	31
3.14	<i>Throughput</i> medio por usuario en función de N en UC en el <i>uplink</i>	32
3.15	Capacidad de <i>fronthaul</i> media necesaria por AP en UC y UC2.	33

ÍNDICE DE CUADROS

3.1	Parámetros del sistema.	20
-----	---------------------------------	----

ACRÓNIMOS

APs Access Points

MSs Mobile Stations

CF Cell Free

UC User Centric

BS Base Station

CPU Central Processing Unit

TDD Time Division Duplexing

FDD Frequency Division Duplexing

TFG Trabajo Final de Grado

PM Pilot Matched

S-LMMSE Scalar- Linear Minimum Mean Square Error

CSI Channel State Information

fd_a función de distribución acumulada

RESUMEN

La demanda de cantidades ingentes de datos móviles que será provocada por el gran aumento de terminales móviles existentes junto con el uso de nuevas aplicaciones con un mayor consumo de estos datos ha desembocado en la necesidad de investigar nuevas técnicas que permitan satisfacer dicha demanda. Con este propósito surgen diferentes propuestas de arquitecturas que pretenden mejorar el rendimiento de las actuales redes de telecomunicaciones que ofrecen servicio a Internet y sentar las bases de los futuros sistemas de comunicaciones. Entre estas nuevas propuestas aparece *Cell Free Massive MIMO* que deja atrás las clásicas redes celulares y que pretende superar su rendimiento de forma drástica combinando las ventajas de un sistema con múltiples antenas y de un sistema distribuido.

Cell Free Massive MIMO se basa en el despliegue de forma aleatoria de un gran número de pequeñas estaciones base conocidas como *Access Point* sobre un área determinada. Estos puntos de acceso están conectados a una Unidad Central de Procesado mediante una red de *fronthaul* y se encargan de proporcionar acceso a Internet a los usuarios del sistema de forma simultánea. Sin embargo, esta arquitectura presenta una carencia que la hace poco escalable: el tráfico total que circula a través de la red de *fronthaul* crece en función del número de usuarios de la red, ya que todos los *Access Points* de la red proporcionan servicio a todos los usuarios del sistema. Es por eso que surge otra nueva propuesta denominada *User Centric Cell Free Massive MIMO* derivada de *Cell Free* con la que se reduce la cantidad de tráfico que circula a través de la red de *fronthaul*. La principal diferencia es que ahora los *Access Points* de la red solamente proporcionan servicio a un número determinado de usuarios y la cantidad de tráfico que circula a través de esta red, es por lo tanto independiente del número de usuarios del sistema. De hecho, la carga de tráfico de esta red depende principalmente de un parámetro: el número de usuarios a los que da servicio un *Access Point*.

En este Trabajo Final de Grado (TFG) se comparan las prestaciones de las arquitecturas *Cell Free* y *User Centric* en cuanto a la tasa de transmisión proporcionada a los usuarios del sistema en el *uplink* y *downlink* y a la capacidad de *fronthaul* necesaria en las estaciones base (o *Access Points*) del sistema para dar servicio a los usuarios. Esta comparativa se lleva a cabo teniendo en cuenta diferentes valores de los parámetros básicos del sistema tales como el número de usuarios del sistema, el número de usuarios a los que da servicio un *Access Point* en *User Centric* o el tiempo que se tarda en obtener la información los canales de comunicación. A pesar de que ambas arquitecturas proporcionan una tasa de transmisión muy parecida a los usuarios del sistema en el *downlink*, los usuarios de una red basada en *User Centric* obtienen mejor tasa de transmisión en el *uplink*. Además, teniendo en cuenta el funcionamiento básico

de las dos arquitecturas, es fácil comprobar que la capacidad de *fronthaul* necesaria en los *Access Points* para dar servicio a los usuarios en *User Centric* es muy inferior a la que necesitan en *Cell Free*.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el número de dispositivos que requieren datos inalámbricos se ha incrementado de forma exponencial [1], y no hay síntomas que indiquen que dicha tendencia varíe. Estos dispositivos ya no son solamente teléfonos móviles, sino que existe un amplio abanico de terminales como *smartphones*, *tablets*, *smartwatch* y todo tipo de *weareables* y dispositivos de uso cotidiano que requieren estar conectados a Internet y que son capaces de generar y procesar una cantidad mucho mayor de datos que los terminales móviles de las anteriores generaciones. Por otra parte, el uso que se les da a estos dispositivos ya no se limita a la descarga de contenido estático o correo electrónico, sino que los servicios que se están ofreciendo actualmente, como por ejemplo visualización de vídeos en tiempo real (*streaming*), reproducción de vídeos de alta calidad, *VoIP*, juegos online, realidad aumentada y muchos más, en general requieren de una tasa de transmisión muy elevada. Sin embargo, los recursos disponibles en el espectro radioeléctrico son limitados y por lo tanto se deben buscar soluciones que incrementen drásticamente la eficiencia espectral y puedan hacer frente a la futura demanda.

Las redes de telecomunicaciones actuales están basadas en un modelo celular, es decir, una red formada por un grupo celdas en cada una de las cuales se despliega una *Base Station (BS)* que actúa como punto de acceso a Internet. Cada una de estas celdas delimita el área de cobertura a la que da servicio la correspondiente BS y por lo tanto, los usuarios que se encuentren dentro de los límites son servidos por esta BS. Un concepto clave de este tipo de redes es la reutilización frecuencial: se utiliza la misma frecuencia en diferentes celdas para dar servicio a los usuarios. Debido a esto se produce lo que se conoce como interferencia co-canal, es decir, la interferencia producida sobre los usuarios de una celda por otra celda que utiliza la misma frecuencia. Esta interferencia se puede reducir estableciendo una distancia de reutilización que indica la distancia que debe haber entre dos celdas que utilizan la misma frecuencia [2]. Esta distancia determina el factor de reutilización U , que es el número de celdas que se reparten todos los canales disponibles del espectro. En la Figura 1.1 se muestra una red celular en la que el factor de reutilización de frecuencias es $U=3$. Sin embargo, hay dife-

1. INTRODUCCIÓN

rentes soluciones que mejoran la eficiencia espectral y la capacidad de estos sistemas celulares [2], como por ejemplo, el despliegue de celdas más pequeñas mejorando la cobertura y reduciendo el factor de reutilización, la implementación de una estructura multicapa, reducir la frecuencia de reutilización mediante sectorización o mejorar los transmisores y los receptores en cuanto a sensibilidad a las interferencias. Actualmente, las soluciones adoptadas son el incremento del número de BSs desplegadas y la reutilización universal de frecuencias, por lo que todas las BSs transmiten sobre todo el ancho de banda disponible en el sistema sin hacer ningún tipo de repartición de espectro, resultando en un aumento significativo de la interferencia co-canal anteriormente comentada. Este incremento de la interferencia supone uno de los principales problemas ya que afecta directamente a la capacidad de transmisión de los datos móviles.

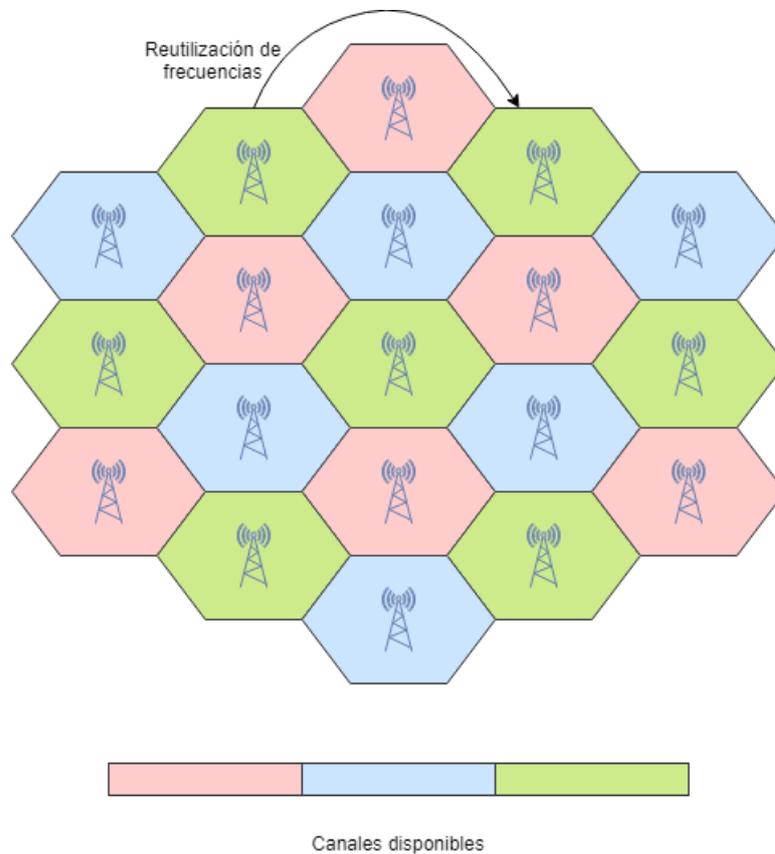


Figura 1.1: Red celular con factor de reutilización frecuencial $U=3$.

La arquitectura celular con reutilización universal junto con el uso de técnicas de múltiples antenas (MIMO) han sido los pilares de la capa física en los actuales estándares 4G. Muy recientemente, la aparición de nuevas formas de MIMO han sido propuestas con vistas al futuro 5G. Una de las propuestas que está siendo estudiada es la arquitectura *Massive* MIMO [1][3][4], en la que se equipa a cada BS con un gran número de antenas. En este tipo de arquitectura los dispositivos finales de los usuarios están equipados, típicamente, con una sola antena y por lo tanto, el despliegue de

equipamiento costoso se limita a las BSs. En la Figura 1.2 se muestra un diagrama del concepto de *Massive MIMO*. En [3], se presenta un sistema basado en *Massive MIMO* donde las BSs están equipadas con un número de antenas muy elevado (100 o más) y sirven simultáneamente a un grupo reducido de usuarios. Bajo estas condiciones, los efectos de los desvanecimientos a pequeña escala desaparecen, la energía transmitida por bit se reduce a medida que el número de antenas aumenta y la eficiencia espectral y energética mejoran significativamente utilizando técnicas de procesamiento de señal relativamente sencillas evitando aumentar la complejidad del sistema.

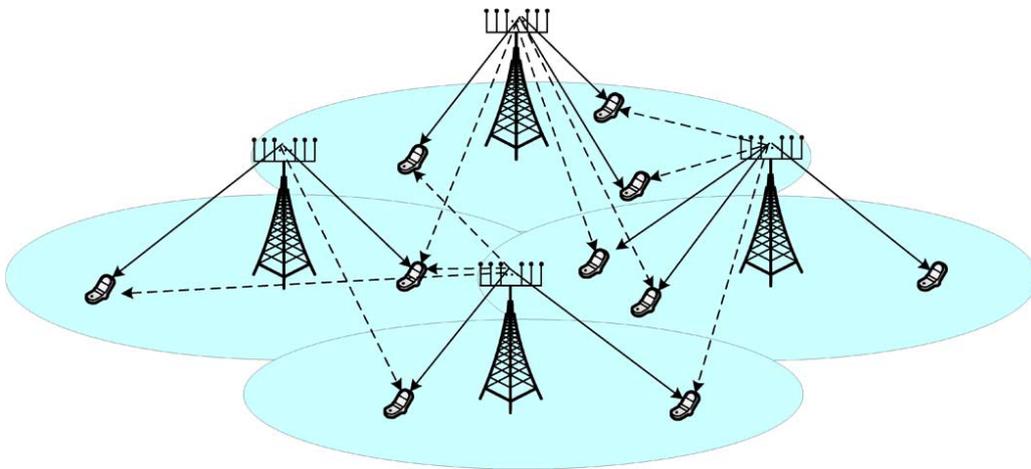
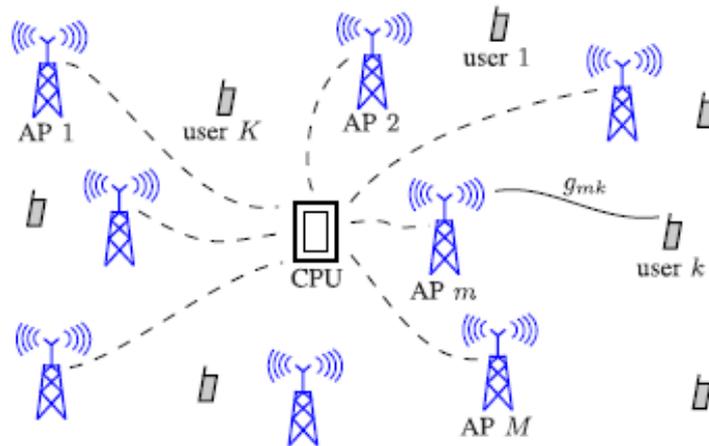


Figura 1.2: Ilustración de un sistema *Massive MIMO* celular.

Siguiendo esta línea de investigación, recientemente ha aparecido el concepto de *Cell Free (CF) Massive MIMO* [5][6]. Este concepto hace referencia a un nuevo tipo de arquitectura que se fundamenta en *Massive MIMO* pero que sin embargo, deja de lado la estructura celular de las redes de telecomunicaciones vistas hasta ahora. *Cell Free Massive MIMO* se basa en el despliegue de forma distribuida de un número muy elevado de estaciones base a las que se identifica como *Access Points (APs)* y que dan servicio a un número de usuarios o *Mobile Stations (MSs)* también con una sola antena. Se suele asumir que el número de APs es mucho mayor que el número de usuarios a los que se va a dar servicio. Estos APs están conectados a una Unidad Central de Procesado o *Central Processing Unit (CPU)* mediante una red de *fronthaul* tal y como se muestra en la Figura 1.3. Esta arquitectura se puede considerar una forma de *Massive MIMO* distribuido.

Los APs del sistema sirven de manera simultánea a las diferentes MSs utilizando la misma banda frecuencial. En la Figura 1.4 se muestra un ejemplo sencillo donde solamente hay tres BSs y cuatro MSs y cada uno de estos APs da servicio a cada MS. La propuesta inicial basa la comunicación entre los APs y las MSs en el uso de duplexación temporal o *Time Division Duplexing (TDD)*, sin embargo, se están investigando nuevas propuestas para llevarla a cabo mediante duplexación frecuencial o *Frequency Division Duplexing (FDD)* [7]. Para poder realizar esta comunicación correctamente, los APs necesitan conocer la información sobre las características de los canales de propagación hacia las MSs. Los APs obtienen esta información gracias a unas secuencias de

Figura 1.3: Arquitectura *Cell Free Massive MIMO*.

pilotos de entrenamiento recibidas por parte de todos los usuarios, con las que pueden calcular la estimación de los canales de forma local (no interviene la CPU). Gracias a esta estimación los APs pueden precodificar y decodificar los datos con técnicas de procesamiento de señales de baja complejidad (*beamforming* conjugado [8]) para realizar la transmisión de bajada y de subida, respectivamente, con el objetivo de que cada usuario pueda recibir los datos que le corresponden y de poder identificar los datos que provienen de cada usuario. Por lo tanto, el proceso de comunicación consta de tres fases: estimación del canal (fase de entrenamiento), transmisión de datos de bajada y transmisión de datos de subida.

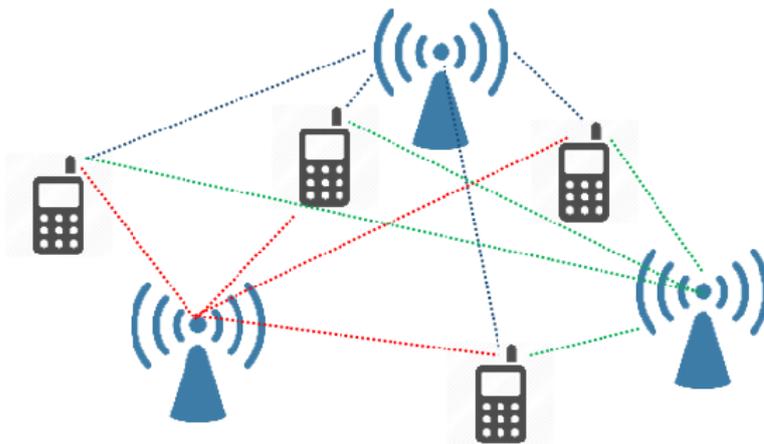


Figura 1.4: Sistema CF. Cada AP sirve a todas las MS del sistema.

Según [5], un sistema basado en CF es capaz de garantizar una tasa de transmisión mínima a los usuarios mayor que una arquitectura basada en Small Cell sin embargo, se indica que una arquitectura CF requiere una mayor complejidad en cuanto a la red de *fronthaul*. Este aspecto es una de las posibles limitaciones de CF, ya que la cantidad de tráfico que se transmite a través de la red troncal es muy elevada debido a que cada

AP tiene que dar servicio a cada MS.

En este TFG se pretende comparar un sistema CF con una propuesta conocida como User Centric (UC) basándose en [6]. *User Centric distributed Massive MIMO* surge como una arquitectura que pretende superar el rendimiento de *Cell Free Massive MIMO* en relación a la tasa de transmisión de los usuarios y al ahorro de la capacidad de la red de *fronthaul*. Esta nueva arquitectura, igual que la otra, se fundamenta en los conceptos de *Massive MIMO* y *Distributed MIMO*. Es decir, un número elevado de APs se despliega sobre un área determinada de manera distribuida con el fin de dar servicio a un número normalmente menor de MSs. Igual que en CF, con esta arquitectura se explota el fenómeno de macro-diversidad y se consigue una mejor cobertura respecto a sistemas MIMO celulares [6], [9], sin embargo, difiere de CF en cuanto al número de usuarios a los que da servicio un AP: se asume que un AP no sirve a todas las MSs, sino que solamente da servicio a aquellas cuyo canal de propagación es 'mejor' (normalmente los usuarios más cercanos) tal y como se muestra en la Figura 1.5, es decir, en UC se restringe la comunicación entre los APs y las MSs. En cuanto al proceso de comunicación, cada AP tiene que seleccionar a los usuarios a los que va a dar servicio. En [6] se muestran diferentes maneras para determinar el grado de 'cercanía' entre un usuario y un AP para así determinar los usuarios a servir.

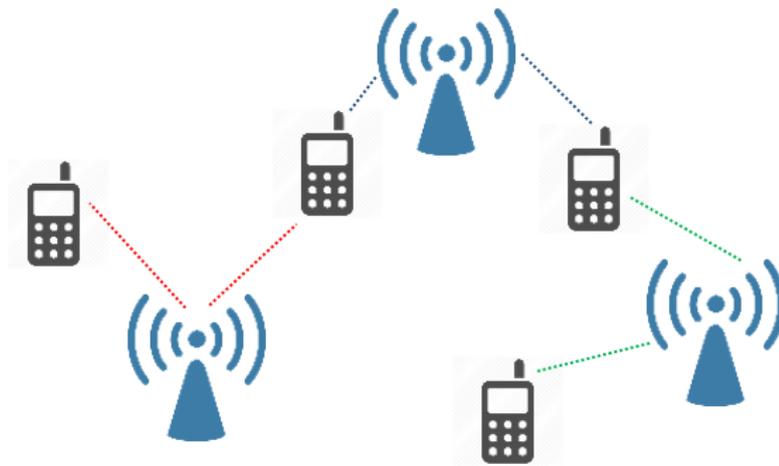


Figura 1.5: Sistema UC. Ilustración de las MS a las que va a servir cada AP.

En [6] se ha comparado CF *Massive MIMO* y la forma *User Centric* en cuanto al *throughput* medio obtenido por usuario en función de diferentes parámetros del sistema como por ejemplo, la potencia de transmisión o el número de usuarios a los que sirve un AP. Las estrategias para calcular la estimación de los canales son *Pilot Matched (PM)* y *Perfect Channel State Information (CSI)*. En este TFG se ha realizado la misma comparación, pero teniendo en cuenta también la estrategia *Scalar- Linear Minimum Mean Square Error (S-LMMSE)* para la estimación de canal. Además, también se ha evaluado el impacto sobre las prestaciones del sistema producido por otros parámetros como la duración de la fase de entrenamiento o el número de usuarios del sistema. También se ha hecho especial hincapié en comparar ambas arquitecturas en términos de la capacidad de *fronthaul* necesaria en los APs para dejar clara evidencia de las ventajas

que aporta UC en este sentido. Finalmente se ha introducido una propuesta a la que se denomina *User Centric 2*. En esta propuesta a diferencia de UC, un AP no sirve a un número determinado de usuarios, sino que cada usuario será servido por un número determinado de APs.

La memoria queda estructurada de la siguiente manera:

En el Capítulo 2 se presenta el modelo matemático utilizado para realizar las simulaciones de este trabajo, así como una descripción detallada de cada una de las fases del proceso de comunicación de las arquitecturas propuestas. En primer lugar se comentan los aspectos comunes en las arquitecturas así como una breve descripción del funcionamiento básico y de las consideraciones que se han tenido en cuenta para el proceso de comunicación entre los APs y las MSs. En segundo lugar se define el modelo de canal utilizado para simular los canales de propagación entre los APs y los usuarios. Finalmente se detalla para cada fase el modelo matemático utilizado en cada arquitectura.

En el Capítulo 3 se analizan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas. Primero se describen los valores de los parámetros utilizados en estas simulaciones. A continuación se han evaluado el *throughput* medio por usuario y la capacidad de *fronthaul* media necesaria por AP para ambas arquitecturas en función de parámetros clave del sistema tales como el número de usuarios del sistema, la duración de la fase de entrenamiento y por último en función del número de usuarios servidos.

Concluyendo la memoria, en el Capítulo 4, se hace un valoración de los resultados obtenidos en el Capítulo 3 para determinar las ventajas que presenta una arquitectura respecto a la otra y postular a una de las dos como mejor opción para cumplir con los objetivos de 5G y satisfacer las necesidades de las futuras redes de telecomunicaciones.

1.1 Notación matemática

A continuación se definen las diversas notaciones utilizadas en este TFG. Las matrices serán representadas por letras mayúsculas en negrita \mathbf{R} , los vectores columna por minúsculas en negrita \mathbf{r} , los escalares por minúsculas sin negrita r . Las matrices $(\mathbf{R})^*$, $(\mathbf{R})^T$ y $(\mathbf{R})^H$ representan la matriz conjugada, la matriz transpuesta y la matriz Hermítica de \mathbf{R} respectivamente. La norma Euclidiana y la esperanza estadística se representan mediante $\|\cdot\|$ y $\mathbb{E}[\cdot]$ respectivamente. Finalmente, $z \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ denota una variable aleatoria (VA) compleja Gaussiana circular z con media cero y varianza σ^2 y $z \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ denota una variable aleatoria Gaussiana normal.

CELL FREE MASSIVE MIMO VS USER CENTRIC

2.1 Modelo de sistema

Para la realización de este trabajo se considera una zona de cobertura cuadrada en la que se encuentran un número M de APs desplegados de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme bidimensional y un número K de MSs a las que se les da servicio, también desplegadas de forma aleatoria y siguiendo el mismo tipo de distribución. Los M APs están conectados a una Unidad Central de Procesado (CPU) mediante una red de *fronthauls*. Esta CPU es la que se encarga de realizar todas las operaciones de decodificación de los datos recibidos que provienen de los APs del sistema.

Siguiendo el modelo de sistema que se plantea en [5], [6] y [10], las comunicaciones entre los APs y las MSs se llevan a cabo sobre la misma banda frecuencial utilizando TDD. Uno de los hechos clave por los que se selecciona esta técnica de duplexación es que el canal de propagación tanto en la transmisión de subida (*uplink*) como en la de bajada (*downlink*) se asume que es el mismo teniendo en cuenta que para esto es necesario que el hardware esté perfectamente calibrado tal y como se explica en [5].

Para poder realizar la comunicación de forma correcta, los APs necesitan disponer de información sobre el estado de los canales de propagación hacia las MSs a las que proveen de servicio. Para el cálculo de la estimación de los canales por parte de los APs, los usuarios transmiten unos pilotos de entrenamiento. Esta estimación de los canales la realizan los APs de forma local, sin tener que saturar la red de *fronthaul* ni la CPU. Gracias a la estimación de canal calculada por los APs, estos pueden precodificar y decodificar los datos con técnicas de procesamiento de señal de baja complejidad para realizar la transmisión de bajada y de subida respectivamente. Finalmente, cada usuario recibe los datos que le corresponden y los APs identifican los datos recibidos de cada usuario. Estas tres fases se tienen que repetir como mínimo con una frecuencia marcada por el intervalo de coherencia de los canales, ya que éste es el tiempo durante el cual

un canal de propagación se mantiene prácticamente constante. Por lo tanto, como se muestra en la Figura 2.1, cada intervalo de coherencia se divide en tres fases: estimación del canal (fase de entrenamiento), transmisión de datos de bajada y transmisión de datos de subida. La duración conjunta de estas tres fases no debe superar la duración del intervalo de coherencia del canal, ya que de lo contrario, las características de los canales entre los APs y las MSs serían diferentes y las estimaciones calculadas no serían válidas.

Como se ha comentado anteriormente, se asume que la transmisión de los pilotos se realiza mediante TDD. Por una parte, en un sistema donde se usa FDD el canal de bajada y el canal de subida utilizan distintas bandas frecuenciales, por lo que el canal de subida y de bajada entre un AP y una MS es distinto. Este hecho implica que se debe realizar una fase de entrenamiento para el canal de bajada, y otra fase de entrenamiento para el canal de subida. La fase de entrenamiento para el canal de subida es idéntica a la que se ha explicado arriba, en la cual los usuarios transmiten simultáneamente las secuencias de pilotos. Mientras que para la fase de entrenamiento del canal de bajada, son los APs quienes transmiten las secuencias y posteriormente, los usuarios tienen que enviar la estimación que han obtenido de vuelta mediante un canal de *feedback*. Con un número elevado de APs, la duración de estas fases prácticamente consume la totalidad del intervalo de coherencia. A pesar de esto, en [3] se proponen diferentes técnicas para reducir el impacto de esta fase. En las figuras 2.1 y 2.2 se muestra la división del intervalo de coherencia entre las diferentes fases cuando se usa TDD y cuando se usa FDD respectivamente. Por lo tanto, en este TFG no se considera la transmisión de pilotos de entrenamiento por parte de los APs para la estimación del canal de bajada ya que como se ha dicho, gracias al uso de TDD se asume que es el mismo que el de subida debido a que se usa el mismo espectro. Por otra parte, se asume que los usuarios disponen de información suficiente sobre el canal de propagación gracias a los efectos del *channel hardening* producido por los múltiples APs transmitiendo y por lo tanto no necesitan calcular la estimación de los canales para detectar los datos.

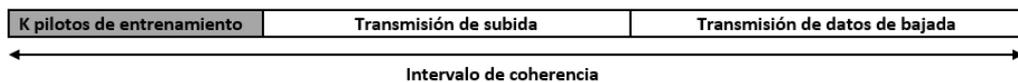


Figura 2.1: Fases del proceso de comunicación en una sistema que utiliza TDD.



Figura 2.2: Fases del proceso de comunicación en un sistema que utiliza FDD

2.1.1 Modelo del canal

En este trabajo se considera el mismo modelo de canal que se expone en [5] y [6]. Como ya se ha dicho, entre cada AP y cada MS existe un canal de propagación que se mantiene prácticamente constante durante la duración del tiempo de coherencia. Cada uno de estos canales de propagación se representa mediante un coeficiente. Para un AP m y una MS k existe el coeficiente $g_{k,m}$ que representa la información sobre el canal de propagación entre ellos. Por lo tanto, en un sistema de M APs y K MSs se define la matriz \mathbf{G} de dimensiones $N_{AP} \times N_{MS}$ (N_{AP} y N_{MS} representan el número de APs y el número de MSs respectivamente) cuyos índices son los coeficientes $g_{k,m}$ para todo $m = 1, \dots, M$ y $k = 1, \dots, K$. El coeficiente $g_{k,m}$ del canal de propagación entre el AP m y la MS k queda definido de la siguiente manera,

$$g_{k,m} = \beta_{k,m}^{\frac{1}{2}} h_{k,m}, \quad (2.1)$$

donde $\beta_{k,m}$ es un coeficiente escalar con el que se modelan las pérdidas de propagación del canal o desvanecimientos a gran escala, y los efectos del *shadowing* del canal y $h_{k,m}$ representa los desvanecimientos a pequeña escala que afectan a ese canal.

Los desvanecimientos a gran escala cambian de forma lenta y por lo tanto se asume que permanecen constantes durante varios intervalos de coherencia [5]. Este coeficiente se define como

$$\beta_{k,m} = 10^{\frac{PL_{k,m}}{10}} 10^{\frac{\sigma_{sh} z_{k,m}}{10}}, \quad (2.2)$$

donde $PL_{k,m}$ representa las pérdidas de propagación entre el AP m y el usuario k (expresadas en dB), el término $10^{\frac{\sigma_{sh} z_{k,m}}{10}}$ hace referencia a los desvanecimientos causados por el *shadowing* con un valor de desviación estándar igual a σ_{sh} y el término $z_{k,m}$ modela la correlación entre los desvanecimientos causados por el *shadowing* que se producen entre dispositivos que se encuentran a poca distancia entre ellos.

Para modelar las pérdidas de propagación se utiliza el mismo modelo que en [6], definido por

$$P_{k,m} = \begin{cases} -L - 35 \log_{10}(d_{k,m}) & \text{if } d_{k,m} < d_1, \\ -L - 10 \log_{10}(d_1^{1,5} d_{k,m}^2) & \text{if } d_0 < d_{k,m} \leq d_1, \\ -L - 10 \log_{10} d_1^{1,5} (d_0^2) & \text{if } d_{k,m} < d_0, \end{cases} \quad (2.3)$$

donde $d_{k,m}$ es la distancia entre el AP m y el usuario k (expresada en km) y L se define como [6]

$$L = 46,3 + 33,9 \log_{10}(f_0) - 13,82 \log_{10}(h_{AP}) - [1,11 \log_{10}(f_0) - 0,7] h_{MS} + 1,56 \log_{10}(f_0) - 0,8, \quad (2.4)$$

donde f_0 es la frecuencia portadora del sistema expresada en MHz, h_{AP} y h_{MS} son las alturas de las antenas que se encuentran en los APs y en las MSs respectivamente (expresadas en m).

En entornos reales, los dispositivos que se encuentran situados a poca distancia, están rodeados por obstáculos comunes, y por lo tanto, las variables aleatorias referentes

a los desvanecimientos causados por las sombras de dichos obstáculos y que afectan a estos dispositivos están correlacionadas. Como ya se ha mencionado anteriormente, se utiliza $z_{k,m}$ para modelar este aspecto, que es

$$z_{k,m} = \sqrt{\delta} a_m + \sqrt{1 - \delta} b_k, \quad (2.5)$$

para todas las $m = 1, \dots, M$ y todas las $k = 1, \dots, K$ donde $a_m \sim \mathcal{N}(0, 1)$ y $b_k \sim \mathcal{N}(0, 1)$ son variables aleatorias independientes y δ , $0 \leq \delta \leq 1$ es un parámetro que determina el nivel de correlación.

El segundo de los términos que afectan al coeficiente del canal en (2.1) es $h_{k,m}$ y representa los desvanecimientos a pequeña escala que afectan a ese canal. Este término se asume que es una variable aleatoria que sigue una distribución $\mathcal{CN}(0, 1)$, y además que es estadísticamente independiente respecto de k y m , es decir, para todo $m = 1, \dots, M$ y todo $k = 1, \dots, K$. Esto es debido a que tanto los APs como los usuarios están esparcidos en un área extensa y los desvanecimientos afectan de forma distinta a cada uno de ellos.

2.1.2 Fase de entrenamiento - *Uplink Training*

En esta fase los APs van a calcular las estimaciones de los canales de cada una de las MSs del sistema. Para ello, las MSs transmiten una serie de secuencias de entrenamiento que van a permitir a los APs calcular dichas estimaciones. Tanto en la arquitectura *Cell Free* como en *User Centric* esta fase se realiza de forma idéntica.

Se considera que la duración de la fase de entrenamiento es τ_p , expresada en muestras, mientras que la duración total de un intervalo de coherencia es τ_c , también expresado en muestras. El intervalo de coherencia de un canal (en muestras) es igual al producto entre el ancho de banda de coherencia de dicho canal y el tiempo de coherencia de dicho canal. Se asume que $\tau_p < \tau_c$, es decir, la duración de la fase de entrenamiento no puede superar la duración total del intervalo de coherencia, de lo contrario no quedaría tiempo para realizar las otras dos fases en ese intervalo. En esta fase los K usuarios transmiten simultáneamente una secuencia piloto de longitud τ_p muestras (igual a la duración de esta fase). La duración de esta fase está directamente relacionada con la longitud de las secuencias utilizadas existiendo un compromiso entre la duración de estas secuencias y el *throughput* del sistema, ya que cuanto mayor es la longitud τ_p de las secuencias, mayor es la duración τ_c de la fase de entrenamiento y menos tiempo de transmisión efectiva de datos hay disponible y viceversa.

La secuencia piloto transmitida por un usuario k está definida como un vector columna de dimensión τ_p representado como $\boldsymbol{\phi}_k$ y que satisface $\|\boldsymbol{\phi}_k\|^2 = 1$. Lo ideal sería que cada usuario utilizara una secuencia de pilotos ortogonal al resto de secuencias utilizadas. Si $\tau_p > K$, se podría dar este caso y asignar las secuencias $\boldsymbol{\phi}_1, \boldsymbol{\phi}_2, \dots, \boldsymbol{\phi}_K$, todas ortogonales entre sí. Sin embargo, debido a la limitación que supone la longitud del intervalo de coherencia, típicamente $\tau_p < K$, lo que implica que no todos los pilotos serán ortogonales entre sí y habrá usuarios que utilicen la misma secuencia piloto, situación que causará contaminación de pilotos en el sistema. El concepto de contaminación de pilotos o en inglés *pilot contamination* es similar al producido por la reutilización de

frecuencias en una red de comunicaciones celular clásica. En una red celular basada en *Massive MIMO* también se produce esta contaminación entre usuarios que utilizan las mismas secuencias. La reutilización de secuencias de pilotos supone que la estimación de canal derivada de una secuencia piloto entre un AP y una MS está contaminada por los canales entre ese AP y otras MSs que utilicen la misma secuencia piloto. En [3] se habla de diferentes técnicas para mitigar esta contaminación y en [5] se presentan distintas estrategias de asignación de pilotos. En este TFG se asume que la asignación de pilotos en todos los casos es aleatoria, independientemente del número de usuarios y del número de secuencias disponibles. Es decir, existen τ_p secuencias piloto y a cada usuario se le asigna aleatoriamente una de ellas, sin tener en cuenta las veces que una secuencia sea asignada.

Si cada usuario transmite una secuencia, un AP recibe una combinación lineal de las secuencias piloto de todos los usuarios. Por lo tanto la señal recibida por el AP m es un vector de dimensión τ_p definido como

$$\mathbf{y}_m = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} g_{k,m} \boldsymbol{\phi}_k + \mathbf{w}_m, \quad (2.6)$$

donde p_k es la potencia empleada por el usuario k para transmitir durante esta primera fase de entrenamiento y \mathbf{w}_m es un vector de dimensión τ_p que representa el ruido térmico gaussiano blanco, cuyos elementos se asume que son estadísticamente independientes y que siguen una distribución $\mathcal{C}\mathcal{N}(0, \sigma_w^2)$.

Una vez recibida la señal \mathbf{y}_m por el AP m , éste puede realizar las estimaciones de los coeficientes de los canales $\{g_{k,m}\}_{k=1}^K$ entre él y los K usuarios ya que conoce la secuencia piloto que utiliza cada uno de ellos. Además, se asume que el AP conoce la potencia con la que transmiten los diferentes usuarios $\{p_k\}_{k=1}^K$. A continuación se presentan las estrategias que se utilizan en este TFG para realizar la estimación de estos canales:

1. *Estimación de canal Pilot-Matched (PM)*: Esta técnica es la más simple y solamente tiene en cuenta la potencia de transmisión de los usuarios, la secuencia utilizada, y la señal recibida \mathbf{y}_m . Para el canal hacia el usuario k , el AP m calcula la estimación de la siguiente manera:

$$\hat{g}_{k,m} = \frac{1}{\sqrt{p_k}} \boldsymbol{\phi}_k^H \mathbf{y}_m. \quad (2.7)$$

Si las secuencias utilizadas por los usuarios fueran todas ortogonales entre sí, la ecuación anterior queda simplificada de la siguiente manera:

$$\hat{g}_{k,m} = g_{k,m} + \frac{1}{\sqrt{p_k}} \mathbf{w}_m \boldsymbol{\phi}_k^H \quad (2.8)$$

y por lo tanto el ruido térmico gaussiano, \mathbf{w}_m , es el único factor que afecta al cálculo de la estimación. Sin embargo en este TFG no se considera la asignación de secuencias ortogonales aunque se cumpla la condición $\tau_p > K$.

2. *Estimación de canal Scalar Linear Minimum Mean Square Error (S-LMMSE)*: Esta técnica puede proporcionar una estimación muy próxima a la ideal y los resultados obtenidos son muy semejantes a los coeficientes reales de los canales de transmisión. En esta estrategia se asume que los coeficientes de los desvanecimientos a gran escala $\beta_{k,m}$ son conocidos y se calcula la estimación de $g_{k,m}$ (coeficiente del canal real) como

$$\hat{g}_{k,m} = \frac{\sqrt{p_k} \beta_{k,m} \boldsymbol{\phi}_k^H \mathbf{y}_m}{\sum_{j=1}^K p_j \beta_{j,m} |\boldsymbol{\phi}_k^H \boldsymbol{\phi}_j|^2 + \sigma_w^2}. \quad (2.9)$$

3. *Estimación del canal perfecta, Perfect CSI*: Esta estrategia se basa simplemente en asumir que la estimación es perfecta y por lo tanto

$$\hat{g}_{k,m} = g_{k,m}. \quad (2.10)$$

Esta estrategia se usará principalmente para realizar la comparación entre ella y las otras dos estrategias utilizadas en la práctica, con lo cual se podrá ver cuánto se acercan las estimaciones calculadas con esas dos estrategias respecto al valor real de los coeficientes del canal.

Una vez aplicada una de las estrategias anteriores, cada AP dispone de los coeficientes de las estimaciones entre ellos y los diferentes usuarios, es decir, se obtiene la estimación de la matriz $\mathbf{G}_{k,m}$, que denominaremos $\hat{\mathbf{G}}_{k,m}$. Como se ha mencionado anteriormente, este cálculo solamente es válido durante un intervalo de coherencia concreto y deberá repetirse cuando las condiciones del canal varíen.

2.1.3 Transmisión de bajada - *Downlink*

En esta fase, los APs transmiten datos a las diferentes MSs del sistema. Para poder transmitir los datos correctamente a cada usuario, los APs utilizan las estimaciones de los canales calculadas a partir de las secuencias de pilotos transmitidas por los usuarios en la fase anterior como si fueran los canales de propagación reales. Mediante diferentes técnicas de procesamiento de señal, los APs consiguen que cada usuario reciba y pueda recuperar los datos que se le envían. En este TFG la técnica de procesamiento de señal utilizada es el *beamforming* conjugado. Esta técnica de precodificación se basa en multiplicar los símbolos a transmitir a cada usuario por el valor complejo conjugado de la estimación del canal de dicho usuario. Por otra parte, se supone que gracias a los efectos del *channel hardening* producido por la disponibilidad de un elevado número de APs, la información estadística sobre el estado del canal a la que tienen acceso los usuarios será una buena aproximación a la CSI instantánea. Es decir, la variabilidad de la respuesta del canal con respecto a la media disminuye con el número de APs y, por tanto, el uso de un elevado número de APs hace que no sea estrictamente necesaria una fase de estimación de canal en el enlace descendente. Esta fase se realiza de forma diferente en las arquitecturas UC y CF:

1. *User Centric:*

En esta arquitectura cada AP solamente da servicio a un grupo de usuarios. Se asume que este número de usuarios es N . Estos usuarios son, típicamente, los usuarios más cercanos al AP, que son los que tienen el mejor canal de propagación. A pesar de esto, hay diferentes estrategias para seleccionar a estos N usuarios, sin embargo no es el objetivo de este TFG mostrar con cuál de ellas se obtiene un mejor resultado. En este TFG, cada AP selecciona los N usuarios que se correspondan con los N mayores coeficientes de la matriz de canales estimada $\hat{\mathbf{G}}$. En particular, el AP m , una vez calculados los coeficientes $\hat{g}_{k,m}, \forall k = 1, \dots, K$, los ordena de forma descendente y selecciona los N primeros. Este grupo de N usuarios servidos por el AP m se define como $K(m)$. Por lo tanto, conociendo los usuarios que son servidos por cada AP, también se conoce el grupo de APs que sirven a cada usuario, y este grupo se identifica como $M(k)$.

En el caso de la forma UC2, cada MS es servida por un número F de APs, los cuales generalmente son los que tienen el mejor canal de propagación con respecto a esta MS. Sin embargo, ahora no son los APs quienes deciden localmente a que MS sirven, sino que esta información se la indica la CPU ya que se considera que conoce toda la información necesaria sobre los canales de propagación. La CPU ordena de forma descendente los canales entre todos los APs y cada MS y selecciona los F mejores, indicando a estos F APs los usuarios a los que tiene que dar servicio. Igual que en UC clásico, el grupo de usuarios servidos por el AP m es $K(m)$, mientras que el grupo de F APs que sirven a la MS k es $M(k)$. Para esta forma se asume que la CPU tiene la información necesaria para asignar a cada AP las MSs a las que tiene que dar servicio. No se tiene en cuenta que este proceso de asignación entre la CPU y los APs consuma tiempo de los intervalos de coherencia.

Tanto en UC clásico como en UC2, la señal transmitida por cada AP es una combinación de los símbolos a transmitir a los usuarios que sirve. Para el caso de un AP m en el intervalo n transmite

$$s_m(n) = \sum_{k \in K(m)} \sqrt{\eta_{k,m}^{DL}} \hat{g}_{k,m}^* x_k^{DL}(n), \quad (2.11)$$

donde $x_k^{DL}(n)$ es el símbolo que se transmite por el canal de bajada asociado al usuario k , y $\eta_{k,m}^{DL}$ es un escalar cuyo valor representa el coeficiente del control de potencia de transmisión del AP m para este canal de bajada. Este coeficiente sirve para controlar la potencia total que transmite un AP. En este TFG se asume que la potencia de transmisión que el AP m destina al usuario k viene dado por

$$\eta_{k,m}^{DL} = \frac{p_m^{DL}}{\sum_{l \in K(m)} |\hat{g}_{l,m}|^2}. \quad (2.12)$$

Este coeficiente controla la potencia transmitida por el AP m de tal manera que divide la potencia disponible entre los usuarios de forma proporcional a los coeficientes del canal estimados, es decir, que a los usuarios con mejor canal se

les transmite con mayor potencia. La potencia que destina el AP m al usuario k se define como

$$p_{k,m}^{DL} = \frac{p_m^{DL} |\hat{g}_{l,m}|^2}{\sum_{l \in K(m)} |\hat{g}_{l,m}|^2}. \quad (2.13)$$

En esta fase, los M APs transmiten una señal s por el canal de bajada, y que además será recibida por los K usuarios. Sin embargo, debido a que un AP solamente sirve a un grupo reducido de usuarios, la señal que transmite contiene datos útiles para estos usuarios, es decir, para el caso de un AP m que sirve a las $K(m)$ MSs, la señal $s(n)$ será útil para estos $K(m)$, mientras que los otros usuarios, también recibirán esta señal pero no contendrá información útil para ellos. Por lo tanto, un usuario k recibe un conjunto de señales de todos los APs que lo sirven ($M(k)$) y que contribuyen a la estimación del símbolo que le han enviado en el intervalo n . La estimación de los datos que el usuario k realiza a partir de todas las señales recibidas es

$$\hat{x}_k^{DL}(n) = \sum_{m=1}^M g_{k,m} s_m(n) + z_k(n) \quad (2.14)$$

donde $z_k(n)$ es el ruido, que sigue una distribución $\mathcal{CN}(0, 1)$. Conociendo las señales transmitidas por los APs y los símbolos recuperados por las MSs según las ecuaciones (2.11) y (2.14), se puede derivar la definición de la SINR (*Signal-to-Interference plus Noise-Ratio*) para un usuario k , la cual nos proporciona una medida de la calidad de la conexión que tiene este usuario

$$\gamma_k^{DL} = \frac{\left| \sum_{m \in M(k)} \sqrt{\eta_{k,m}^{DL}} g_{k,m} \hat{g}_{k,m}^* \right|^2}{\sigma_z^2 + \sum_{j=1, j \neq k}^K \left| \sum_{m \in M(j)} \sqrt{\eta_{j,m}^{DL}} g_{k,m} \hat{g}_{j,m}^* \right|^2} \quad (2.15)$$

Una vez calculado el valor de la SINR para el usuario k , se puede calcular la tasa de bits disponibles para su canal de bajada, teniendo en cuenta que los símbolos siguen una distribución Gaussiana. El valor obtenido es un umbral superior a la tasa que se conseguiría si se utilizaran modulaciones y esquemas de codificación prácticos. Por lo tanto, considerando que el ancho de banda disponible para la comunicación es W , la tasa de transmisión resultante es

$$R_k^{DL} = W \log_2(1 + \gamma_k^{DL}). \quad (2.16)$$

Se debe tener en cuenta que el valor de R_k^{DL} en (2.16) anterior no es el *throughput* real que puede llegar a alcanzar la MS k para el canal de bajada, ya que no se tiene en cuenta que no se transmiten símbolos y datos útiles durante todo el intervalo de coherencia, sino que durante la fase de entrenamiento, se transmiten las secuencias de piloto, que no constituyen bits de información. La expresión que define el *throughput* efectivo para la MS k se define como

$$S_k^{DL} = \frac{1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}}{2} R_k^{DL}, \quad (2.17)$$

donde el término $\frac{\tau_p}{\tau_c}$ indica que en el intervalo de coherencia de τ_c muestras se destinan τ_p muestras a la primera fase de entrenamiento y por lo tanto, como ya se ha dicho, no se transmiten datos útiles. Por otra parte, se asume que el tiempo destinado a la fase de *uplink* y *downlink* se divide de manera equitativa, de ahí que aparezca el factor $\frac{1}{2}$.

2. *Cell Free*:

La principal diferencia entre esta arquitectura y la UC es, como se ha dicho, que en esta todos los APs sirven a todas las MSs del sistema, mientras que en UC cada AP sirve solamente a un grupo reducido de N MSs. En CF, un AP m genérico, sirve a las K MS. Ahora los APs no seleccionan a un grupo reducido de usuarios sino que a diferencia de UC, $N = K$ y $K(m) = \{1, \dots, K\} \forall m$. Como se observa, CF se puede considerar un caso especial de UC en que $N = K$.

La señal $s(n)$ transmitida por el AP m en el intervalo n en (2.11) en UC, ahora se convierte en

$$s_m(n) = \sum_{k=1}^K \sqrt{\eta_{k,m}^{DL}} \hat{g}_{k,m}^* x_k^{DL}(n), \quad (2.18)$$

donde $\eta_{k,m}^{DL}$ sigue siendo el coeficiente de control de potencia, pero ahora se tiene en cuenta que se divide entre todos los usuarios, es decir,

$$\eta_{k,m}^{DL} = \frac{p_m^{DL}}{\sum_{l=1}^K |\hat{g}_{l,m}|^2}. \quad (2.19)$$

En cuanto a las MSs, ahora reciben una contribución por parte de todos los APs para poder estimar los símbolos que les van dirigidos, ya que todos los APs sirven a todas las MSs. En este aspecto, la estimación de los símbolos recibidos por cada AP no cambia respecto a (2.14).

La ecuación (2.15) de UC, sin embargo, se ve modificada en CF, ya que ahora $M(k) = \{1, \dots, M\}$. Es decir, el grupo de APs que sirven a una MS ahora son todos los APs del sistema. Por lo tanto la SINR de un usuario k en CF es

$$\gamma_k^{DL} = \frac{\left| \sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{k,m}^{DL}} g_{k,m} \hat{g}_{k,m}^* \right|^2}{\sigma_z^2 + \sum_{j=1, j \neq k}^K \left| \sum_{m=1}^M \sqrt{\eta_{j,m}^{DL}} g_{j,m} \hat{g}_{j,m}^* \right|^2}. \quad (2.20)$$

Por último, tanto (2.16) como (2.17) son las mismas para esta arquitectura pero usando la SINR definida en (2.20).

2.1.4 Transmisión de subida - *Uplink*

La fase de transmisión de datos de subida consiste en la transmisión por parte de las MSs del sistema de símbolos de datos hacia los APs. Los K usuarios del sistema transmiten sus símbolos simultáneamente sin necesidad de haber calculado la estimación del canal de subida. Esta última fase del proceso de comunicación entre los APs y las MSs, es idéntica tanto en CF como en UC en la parte de los usuarios, sin embargo, hay diferencias en la parte de los APs en función de la arquitectura utilizada.

En esta fase, las K MSs transmiten sus símbolos a la vez por el canal de subida. Por lo tanto, las K señales transmitidas por los usuarios del sistema llegan a los M APs. La señal captada por el AP m en el instante n del intervalo es la combinación de las K señales transmitidas, es decir,

$$\bar{y}_m = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k^{UL}} \mathbf{g}_{k,m} x_k^{UL}(n) + w_m(n), \quad (2.21)$$

donde p_k^{UL} es la potencia de transmisión del usuario k , $x_k^{UL}(n)$ es el símbolo transmitido por este mismo usuario en la muestra n del intervalo de coherencia, y w_m representa el ruido térmico gaussiano afecta al AP, cuyos elementos se asume que son estadísticamente independientes y que siguen una distribución $\mathcal{CN}(0, 1)$.

1. *User Centric*:

En UC los APs solamente dan servicio a un número N de MSs. Por lo tanto, en esta fase los APs solamente van a decodificar las señales recibidas por las MSs a las que dan servicio a pesar de recibir las señales de todas las MSs. El AP m para cada MS k del grupo de $M(k)$ a las que sirve realiza la operación

$$\tilde{y}_{k,m}(n) = \hat{\mathbf{g}}_{k,m}^* \bar{y}_m(n), \quad (2.22)$$

y una vez realizada, transmite $\tilde{y}_{k,m}(n)$ a la CPU a través de la red de *fronthaul*. Si todos los APs realizan este proceso, la CPU recibirá un total de $M(k)$ estadísticas para poder identificar el símbolo transmitido por el usuario k . Más específicamente, la CPU puede recuperar el símbolo transmitido por la MS k gracias a la información que le han pasado los APs que sirven a ese usuario de la siguiente manera

$$\hat{x}_k^{UL} = \sum_{m \in M(k)} \tilde{y}_{k,m}(n). \quad (2.23)$$

Se puede deducir que gracias a que los APs solamente tienen que transmitir a la CPU las estimaciones de los símbolos del grupo de usuario a los que sirven, el tráfico transmitido sobre la red de *fronthaul* se reduce considerablemente.

Tanto en UC como en UC2, se puede obtener la SINR de los diferentes usuarios del sistema para el *uplink* como

$$\gamma_k^{UL} = \frac{p_k^{UL} \left| \sum_{m \in M(k)} \hat{\mathbf{g}}_{k,m}^* \mathbf{g}_{k,m} \right|^2}{\sigma_w^2 \sum_{m \in M(k)} |\hat{\mathbf{g}}_{k,m}|^2 + \sum_{j=1, j \neq k}^K p_j^{UL} \left| \sum_{m \in M(k)} \hat{\mathbf{g}}_{k,m}^* \mathbf{g}_{j,m} \right|^2}. \quad (2.24)$$

Una vez calculada la SINR de los diferentes usuarios, la capacidad de *uplink* de tasa de transmisión para un usuario k es

$$R_k^{UL} = W \log_2(1 + \gamma_k^{UL}). \quad (2.25)$$

Como en la fase de *downlink*, esta no es la tasa de transmisión real, ya que no se tiene en cuenta que una parte del intervalo se dedica a la fase de entrenamiento y la información transmitida en esa fase no constituye información útil. Por lo tanto, la tasa de transmisión para la MS k en UC y también en UC2 es

$$S_k^{UL} = \frac{1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}}{2} R_k^{UL}. \quad (2.26)$$

Como se ha dicho en la fase de transmisión de bajada, con esta expresión se tiene en cuenta que el tiempo dedicado a las fases de transmisión de datos se divide de forma equitativa entre *uplink* y *downlink*.

2. *Cell Free*:

En Cell Free, a diferencia de la arquitectura anterior, se procesan las K señales recibidas por los M APs. Por lo tanto, como ya se ha mencionado en la fase de *downlink*, se puede considerar que CF es un caso especial de UC donde todos los APs sirven a todas las MSs y en consecuencia $M(k) = \{1, \dots, M\} \forall k = 1, \dots, K$. Teniendo en cuenta esto, (2.22) sigue siendo la misma, pero ahora se va a evaluar para todos los valores $k = 1, \dots, K$.

Una vez realizada la operación descrita en (2.22) para cada usuario, cada AP transmite las K señales procesadas a la CPU a través de la red de *fronthaul*, por lo que en este caso, la cantidad de tráfico que se transporta a través de esta red es mucho mayor que en una arquitectura UC, en la que cada AP solo transporta N señales. Igual que en UC, la CPU recupera los símbolos enviados por los diferentes usuarios gracias a todas las señales recibidas de los APs. Ahora, la CPU recupera los símbolos de un usuario k gracias a las aportaciones de todos los APs que le han transmitido estimaciones de la señal enviada por el usuario k , es decir,

$$\hat{x}_k^{UL} = \sum_{m=1}^M \tilde{y}_{k,m}(n). \quad (2.27)$$

RESULTADOS

En este capítulo se van a plasmar los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas. Se van a comparar las arquitecturas *Cell Free Massive MIMO* y *User Centric* en función de diferentes parámetros del modelo de sistema utilizado. También se analizarán algunos resultados obtenidos a partir de simulaciones realizadas con la arquitectura propuesta en este TFG, *User Centric 2*.

Para la obtención de dichos resultados se ha utilizado la herramienta de software *Matlab* con la que se han programado una serie de *scripts* que modelan las arquitecturas tratadas en este TFG y que sirven para calcular las tasas de transmisión y la capacidad del *fronthaul* necesaria en diferentes escenarios siguiendo el modelo de sistema descrito en la sección 2.1. Cada simulación consiste en el despliegue de M APs y K MSs de forma aleatoria sobre una zona de cobertura cuadrada de dimensiones $L \times L$ m^2 . Para cada despliegue de usuarios se procede al cálculo de la tasa de transmisión tanto en el *downlink* como en el *uplink* y el cálculo de la capacidad del *fronthaul* necesaria en cada AP del sistema.

En todas las simulaciones se van a realizar los cálculos teniendo en cuenta el uso de los tres estimadores de canal ya comentados: *PM*, *S-LMMSE* y *Perfect CSI*.

3.1 Parámetros del sistema

En las simulaciones realizadas se considera que el ancho de banda del sistema es $W = 20$ MHz, y que la frecuencia portadora es $f_0 = 1,9$ GHz. La altura de las antenas de los APs y de las MSs que aparece en (2.4) son 15 m y 1,65 m, respectivamente. La desviación estándar de los desvanecimientos provocados por efectos de *shadowing* son $\sigma_{sh} = 8$ dB, los parámetros del modelo de pérdidas de propagación en (2.3) son $d_1 = 50$ m y $d_0 = 10$ m y el parámetro δ en (2.5) es 0,5. El ruido térmico gaussiano de fondo se asume que tiene una densidad espectral de potencia

3. RESULTADOS

$$N_o = 10 \log_{10}(k_B * T_0), \left[\frac{dBW}{Hz} \right] \quad (3.1)$$

donde $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ (J /K) representa la constante de Boltzmann y $T_0 = 290^o$ (K). Si esta densidad espectral se expresa en $\frac{dBm}{Hz}$ se obtiene $N_o = -174 \frac{dBm}{Hz}$. Por otra parte, la figura de ruido en los APs y las MSs es igual a $NF = 9$ dB. La potencia del ruido sobre el ancho de banda del sistema se expresa como

$$P_n = N_o + NF + 10 * \log_{10}(W). \quad (3.2)$$

Finalmente, la varianza del ruido σ_w^2 es:

$$\sigma_w^2 = 10^{\frac{P_n}{10}}. \quad (3.3)$$

Se considera que todos los APs del sistema tienen la misma potencia de transmisión $p_{downlink}$, y que todas las MSs tienen la misma potencia de transmisión p_{uplink} . Por otra parte, como ya se ha dicho, se asume que la asignación de los pilotos se realiza de forma aleatoria y por lo tanto en los resultados se tienen en cuenta los efectos de la contaminación de pilotos. La duración en muestras del intervalo de coherencia es $\tau_c = 200$. Finalmente, el valor de los parámetros M , K , $p_{downlink}$, p_{uplink} y τ_p se han modificado en función de los diferentes escenarios analizados.

Parámetro	Valor
Frecuencia portadora	1.9 GHz
Ancho de banda	20 MHz
Figura de ruido	9 dB
Altura antena AP	15 m
Altura antena MS	1.65 m
L, d_0, d_1	500, 10, 50 m
σ_{sh}	8 dB
τ_c	200 muestras

Cuadro 3.1: Parámetros del sistema.

3.2 Resultados en función del número de usuarios en el sistema

3.2.1 Throughput

En primer lugar se analizan los resultados obtenidos en función del número de usuarios K . Para cada valor de K analizado se realizan 500 iteraciones (distribuciones aleatorias de usuarios y APs) y los resultados finales son un promedio de los resultados de las 500 iteraciones. El número de APs desplegados aleatoriamente es $M = 100$, la potencia de transmisión de los APs es $p_{downlink} = 200$ mW, la potencia de transmisión de los usuarios es $p_{uplink} = 100$ mW y la longitud en muestras de la fase de entrenamiento (y por lo tanto de las secuencias de pilotos) es $\tau_p = 15$. En la arquitectura UC el número

3.2. Resultados en función del número de usuarios en el sistema

de MSs servidas por cada AP es $N = 5$, mientras que en UC2, cada MS se servirá desde $F = 5$ APs.

En las Figuras 3.1 y 3.3, se comparan los resultados obtenidos utilizando las arquitecturas CF y UC. Las curvas de color azul, rojo y negro, hacen referencia a la estrategia utilizada para la estimación del canal, siendo estas *PM*, *S-LMMSE* y *Perfect CSI* respectivamente.

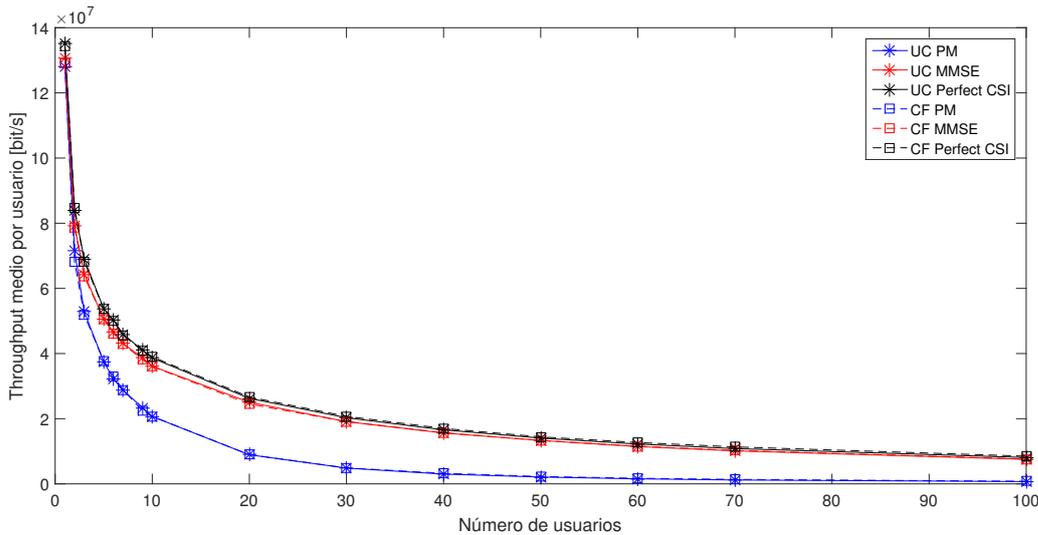


Figura 3.1: *Throughput* medio por usuario en función del número de usuarios del sistema en el *downlink* en CF y UC.

Como se puede observar, en términos de tasa de transmisión obtenida por usuario, ambas arquitecturas presentan unos resultados muy semejantes, sobre todo en el *downlink* (Figura 3.1), en el que las curvas de ambas arquitecturas se solapan. Como era de esperar, el *throughput* obtenido en ambas arquitecturas a medida que el número de usuarios aumenta se va reduciendo, hasta el punto en que se obtiene el *throughput* mínimo, coincidiendo con el caso en que el número de usuarios es igual al número de APs. Se debe tener en cuenta que si el número de usuarios desplegados fuese mayor, el *throughput* disminuiría aún más. Por una parte, este comportamiento es evidente teniendo en cuenta que la longitud de las secuencias de entrenamiento es $\tau_p = 15$ muestras y en este TFG la asignación de secuencias piloto es aleatoria, por lo tanto, aunque $K < \tau_p$, es posible que se reutilicen las secuencias y en consecuencia se produzca contaminación de pilotos. Es por esto que a medida que el número de usuarios aumenta, una secuencia se puede llegar a reutilizar en más ocasiones y la contaminación es mayor, impactando de manera negativa en el *throughput* de los usuarios. Por otra parte, un mayor número de usuarios resulta en la aparición de más interferencias por lo que la SINR de los usuarios disminuye, afectando de manera directa a su *throughput*.

En la Figura 3.2, se muestran los resultados obtenidos en UC en el *downlink* asignando secuencias ortogonales cuando $K < \tau_p$ mientras que cuando $K > \tau_p$ se asignan las τ_p secuencias de forma aleatoria. En este caso, con PM se aprecia una mejora significativa cuando el número de usuarios es menor que la longitud de las secuencias y

3. RESULTADOS

utilizan secuencias ortogonales entre sí, evitando la contaminación de pilotos, mientras que las mejoras usando S-LMMSE son prácticamente imperceptibles. En CF, el comportamiento es el mismo.

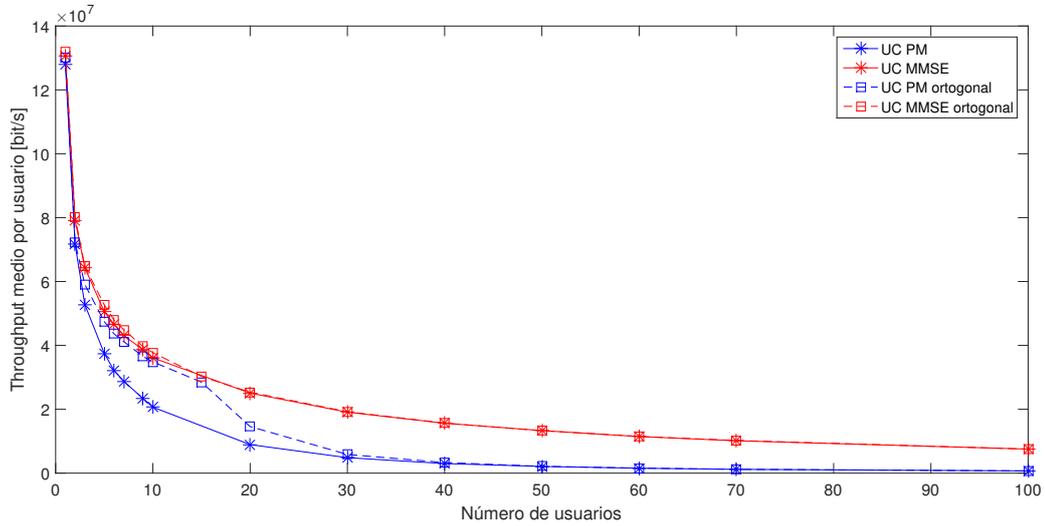


Figura 3.2: *Throughput* medio por usuario en función del número de usuarios del sistema en el *downlink* asignando parcialmente secuencias ortogonales en CF y UC.

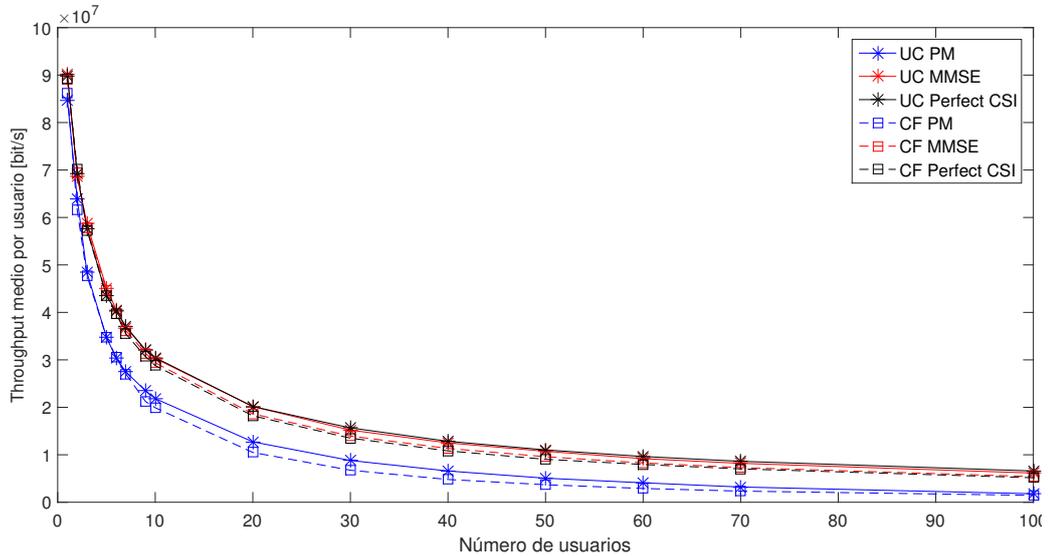


Figura 3.3: *Throughput* medio por usuario en función del número de usuarios del sistema en el *uplink* en CF y UC.

En cuanto al *uplink* (Figura 3.3), la arquitectura UC proporciona *throughput* medio por usuario ligeramente mayor a partir de $K=6$. Cuando $K=30$ y la estimación de canal se ha realizado con S-LMMSE, el *throughput* medio por usuario en UC y en CF es igual a 15,2 y 13,95 Mbit/s, respectivamente, mientras que si la estimación se ha realizado

con PM, el *throughput* medio por usuario es igual a 8,79 Mbit/s (UC) y 6,75 Mbit/s(CF), respectivamente.

Tal y como se ha comentado en el capítulo anterior, la estimación de canal obtenida con PM es menos precisa y esto se refleja en los resultados: el *throughput* obtenido con esta estrategia es siempre inferior al obtenido utilizando la estrategia S-LMMSE. Esto es normal teniendo en cuenta que PM se basa íntegramente en la ortogonalidad de los pilotos para realizar la estimación y no tiene en cuenta ni las interferencias causadas por la contaminación de pilotos ni la presencia de ruido blanco. Las curvas obtenidas con PM se acercan a las obtenidas con S-LMMSE cuando K es muy reducido ya que cuanto menor es el número de usuarios mayor es la probabilidad de asignarles secuencias ortogonales entre sí. Se puede observar en la Figura 3.2 que mientras $K \leq \tau_p$ la curva de PM está justo por debajo de la de S-LMMSE. Por otra parte, los resultados obtenidos utilizando S-LMMSE se aproximan en gran medida a los resultados obtenidos utilizando Perfect CSI incluso considerando los efectos de la contaminación de pilotos.

A pesar de obtener resultados muy similares en cuanto a la tasa de transmisión tanto en UC como en CF, a continuación se va a ver que UC obtiene mejores resultados con relación a la capacidad de *fronthaul* requerida en los APs del sistema.

3.2.2 Capacidad de Fronthaul

Como ya se ha comentado antes, CF y UC son dos arquitecturas que presentan unos resultados muy parecidos en cuanto al *throughput* medio obtenido por parte de los usuarios, sin embargo, hay una diferencia muy significativa con relación a la capacidad de *fronthaul* que requieren los APs de una arquitectura y de otra para dar servicio a los usuarios. Tal y como se explica en el capítulo 2, en UC se espera que esta capacidad sea muy inferior a la de CF basándose en el hecho que no todos los APs en UC se comunican con todas las MSs a diferencia de CF en la que cada AP se comunica con cada MS y teniendo en cuenta que un AP tiene que disponer de todos los datos de los usuarios a los que sirve. Por lo tanto, un AP necesita tener información de muchos más usuarios en CF que en UC.

Durante la fase de transmisión de bajada tal y como se ha explicado, en CF un AP tiene que transmitir los símbolos de los K usuarios a los que sirve, mientras que este número se reduce a N con la arquitectura UC. Si además se tiene en cuenta que todos estos símbolos se transmiten desde la CPU a los M APs, se aprecia la gran diferencia entre ambas arquitecturas: en CF la CPU tiene que transmitir en cada intervalo MK símbolos (para que cada AP pueda transmitir los símbolos de todos los usuarios), mientras que en UC, solamente tiene que transmitir un total de MN símbolos en el mismo intervalo (para que cada AP pueda transmitir los símbolos a los N usuarios que sirve).

Durante la fase de *uplink*, en CF, los APs del sistema decodifican los K símbolos recibidos por parte de las MSs y los envían a la CPU a través de la red de *fronthaul* en cada intervalo, resultando en un total de MK símbolos transmitidos hacia la CPU. En UC sin embargo, los APs solamente procesan las señales de N usuarios, y finalmente se transmiten un total de MN símbolos hacia la CPU en cada intervalo, haciendo evidente

3. RESULTADOS

la diferencia de carga en la capacidad de *fronthaul* del sistema entre ambas arquitecturas. Por otra parte, se debe tener en cuenta el *overhead* provocado en UC debido al proceso de selección de los N usuarios. En este TFG no se ha considerado este *overhead* pero se presume sea despreciable.

En la Figura 3.4 se muestra la función de distribución acumulada (fda) de la capacidad de *fronthaul* media necesaria por AP en el sistema en UC (continuas) y en CF (discontinuas) en el caso del *downlink*. En este caso, $M = 100$, $K = 30$, $p_{downlink} = 200$ mW, $p_{uplink} = 100$ mW, $\tau_c = 200$ muestras y $\tau_p = 15$ muestras. Claramente se pueden observar las diferencias entre las dos arquitecturas. En CF y con S-LMMSE todos los APs del sistema requieren una capacidad de *fronthaul* superior a los 400 Mbit/s (entre 400 y 800 Mbit/s) mientras que en UC, el 10% de los APs necesitan menos de 88,7 Mbit/s, y el máximo de capacidad que necesita un AP son aproximadamente 270 Mbit/s. En la Figura 3.4 se observa que con PM, la curva de la capacidad de *fronthaul* parece indicar mejores resultados que con S-LMMSE, sin embargo, esto es debido a que el *throughput* de los usuarios es menor con PM y en consecuencia la capacidad necesaria en los APs del sistema también disminuye.

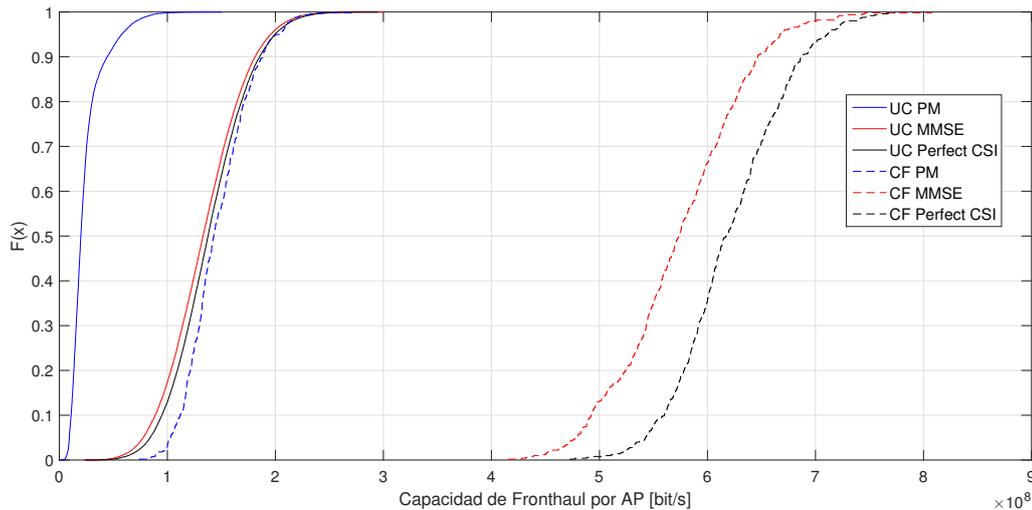


Figura 3.4: Función de distribución acumulada de la capacidad de *fronthaul* media necesaria por AP en CF y UC.

A continuación se analizan los resultados obtenidos en relación a la capacidad de *fronthaul* en función del número K de usuarios (Figura 3.5). Solamente se analizan estos resultados para el caso del *downlink*.

Como ya se ha comentado, la carga que necesitan los APs para dar servicio a los usuarios es mucho mayor en CF que en UC. Tanto con PM como con S-LMMSE, las curvas de UC presentan menor carga. Cuando $K=30$, en CF con el estimador de canal S-LMMSE, la capacidad media necesaria en un AP es de 573,9 Mbit/s mientras que en UC con el mismo estimador son 139,3 Mbit/s, es decir, la capacidad necesaria en CF es aproximadamente 4 veces superior a la necesaria en UC sin que ello conlleve pérdidas de prestaciones a nivel de *throughput*. Por otra parte, se observa la relación entre los

3.2. Resultados en función del número de usuarios en el sistema

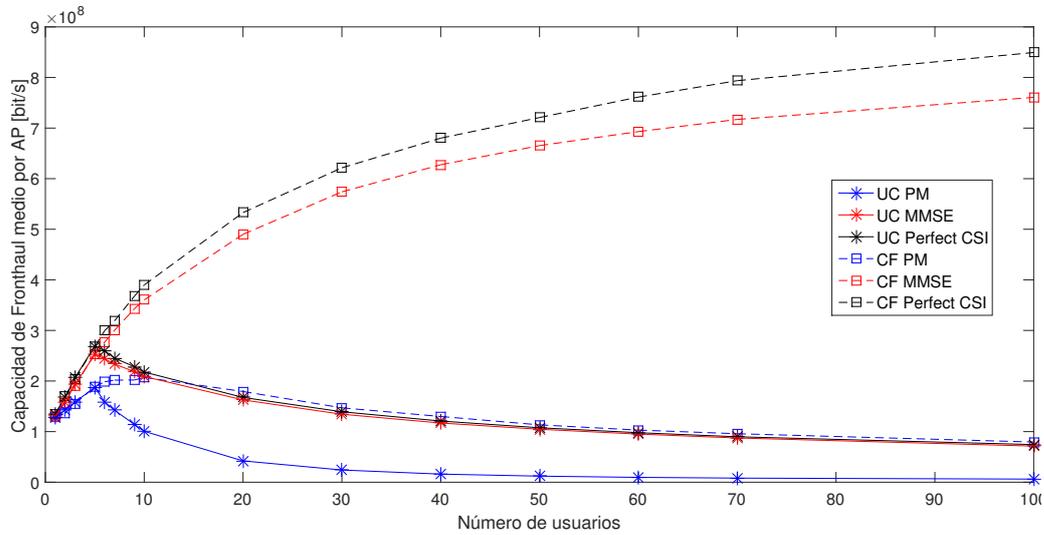


Figura 3.5: Capacidad de *fronthaul* media necesaria por AP en CF y en UC.

resultados de esta figura y los de la Figura 3.1, ya que a medida que aumenta el número de usuarios disminuye su *throughput* y finalmente también se reduce la capacidad de *fronthaul* necesaria en los APs. De la misma manera se pueden relacionar las dos figuras para entender por qué con pocos usuarios el *fronthaul* aumenta: como se ha dicho anteriormente, con pocos usuarios las secuencias asignadas tienen más probabilidad de ser ortogonales y por lo tanto, el *throughput* se incrementa, provocando también el incremento del *fronthaul*. Si se analizara el caso en el que se asignan pilotos ortogonales a los 15 primeros usuarios, la curva de PM se asemejaría a la de S-LMMSE hasta que $K = \tau_p$.

User Centric 2

En la arquitectura propuesta en este TFG, User Centric 2, cada MS solamente es servida por F APs. A pesar de que el *throughput* medio por usuario es un poco inferior al obtenido con UC, se observan diferencias en la capacidad de *fronthaul* necesaria en los APs de ambas arquitecturas. En la Figura 3.6 se muestra la fda obtenida con las dos arquitecturas UC. Las simulaciones se han llevado a cabo con los mismos valores de los parámetros utilizados para obtener los resultados de la Figura 3.4. En este caso, en UC N=5, y en UC2 F=5, es decir, cada usuario en UC2 es servido por 5 APs.

Tal y como se muestra en la gráfica, una gran cantidad de APs en UC2 requieren un valor muy bajo de la capacidad de *fronthaul* para dar servicio a las MSs. Esto es debido a que en UC2, un AP solamente da servicio a una MS si es uno de los F AP con mejor canal de propagación. Según la Figura 3.6, en UC2 con S-LMMSE más de un 30% de los APs no sirven a ninguna MS. Por otra parte, si se utiliza PM casi un 60% de los APs del sistema no sirven a ninguna MS. Esta situación indica que con esta arquitectura no se aprovecha el despliegue de un número tan elevado de APs si F es un número pequeño. En la Figura 3.7 se muestran los resultados de estas simulaciones con relación

3. RESULTADOS

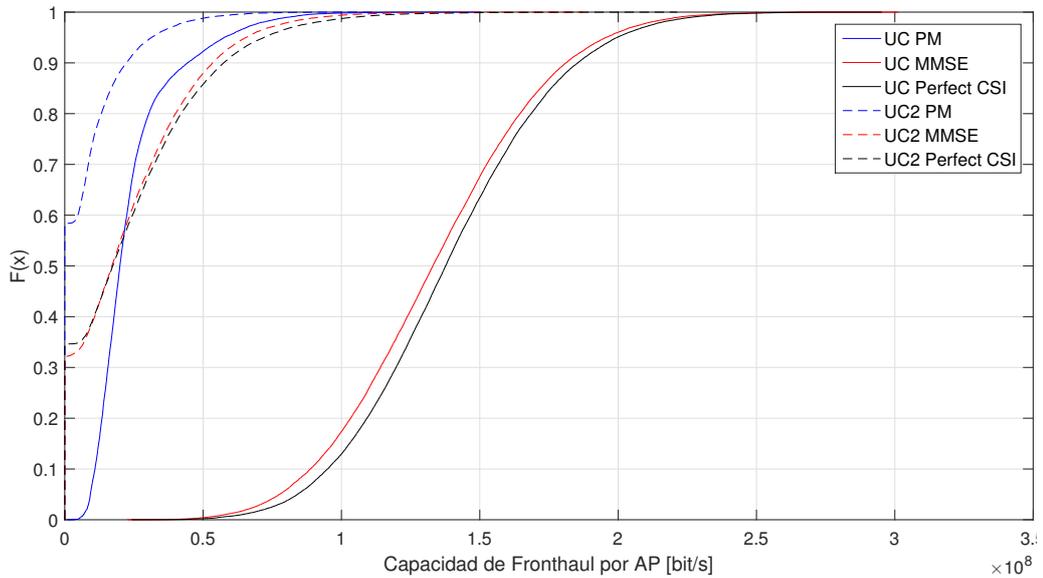


Figura 3.6: Función de distribución acumulada de la capacidad de *fronthaul* media necesaria por AP en UC y UC2.

a la capacidad de *fronthaul* medio variando K.

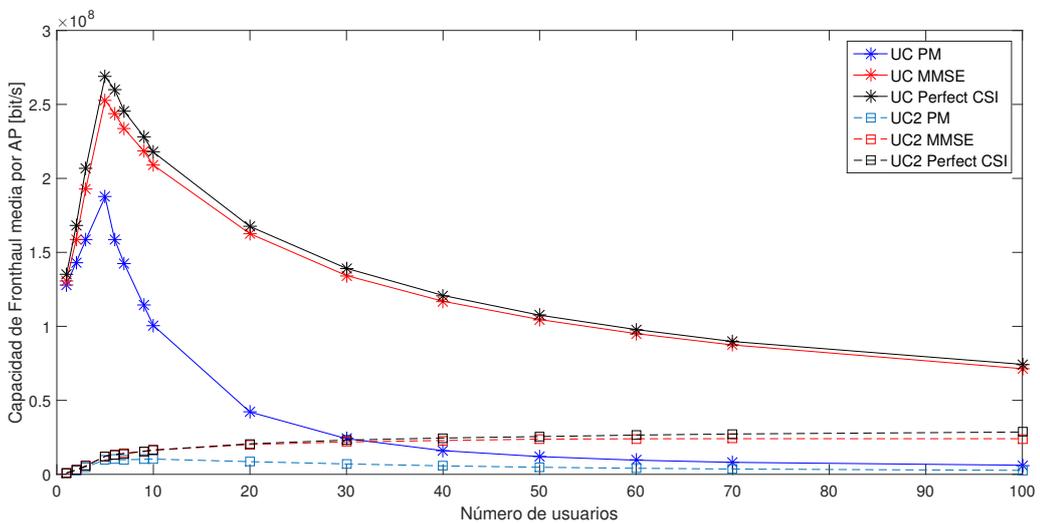


Figura 3.7: Capacidad de *fronthaul* media necesaria por AP en UC y UC2.

Teniendo en cuenta que los resultados de la gráfica son el promedio de la capacidad de *fronthaul* necesaria en cada AP del sistema, es evidente que el resultado final de UC2 sea tan bajo, ya que un gran número de APs no da servicio a ninguna MSs y en consecuencia la capacidad necesaria en estos APs son 0 Mbit/s. Como ya se ha dicho anteriormente, para un número F pequeño (en este caso $F=5$), no se aprovecha

el despliegue de un número tan elevado de APs y por lo tanto, se debe aumentar este parámetro para mejorar los resultados obtenidos. En la gráfica se muestra que la capacidad media de *fronthaul* requerida por AP en UC2 es muy inferior a la que necesita un AP en UC, pero como se acaba de decir, este resultado es el promedio de los que no dan servicio a ninguna MS y de los que sí que dan servicio. Si solamente se hace el promedio de la capacidad que necesitan los APs que sí que dan servicio a alguna MS, la curva es más parecida a la de UC.

3.3 Resultados en función de la duración de la fase de entrenamiento

3.3.1 Throughput

Hasta ahora se ha hablado de que la longitud de la fase de entrenamiento τ_p es un parámetro importante del sistema, ya que en función de su duración se dedica más o menos tiempo a las fases de transmisión de información útil tanto en *uplink* como *downlink*. Cuanto mayor duración tenga esta fase (en muestras), más probabilidades habrá de asignar secuencias ortogonales a los usuarios, sin embargo, como se indica en (2.17) y (2.26), el *throughput* en el *uplink* y *downlink* se reduce debido a que se dedica menos tiempo de transmisión de información útil. Por lo tanto, es importante establecer un valor de τ_p que optimice el *throughput* definido en (2.17) y (2.26). A continuación se analizan los resultados obtenidos a partir de estas dos ecuaciones en función del valor de τ_p . Los otros parámetros del sistema siguen siendo los mismos: $M = 100$, $K = 30$, $p_{downlink} = 200$ mW, $p_{uplink} = 100$ mW y $\tau_c = 200$.

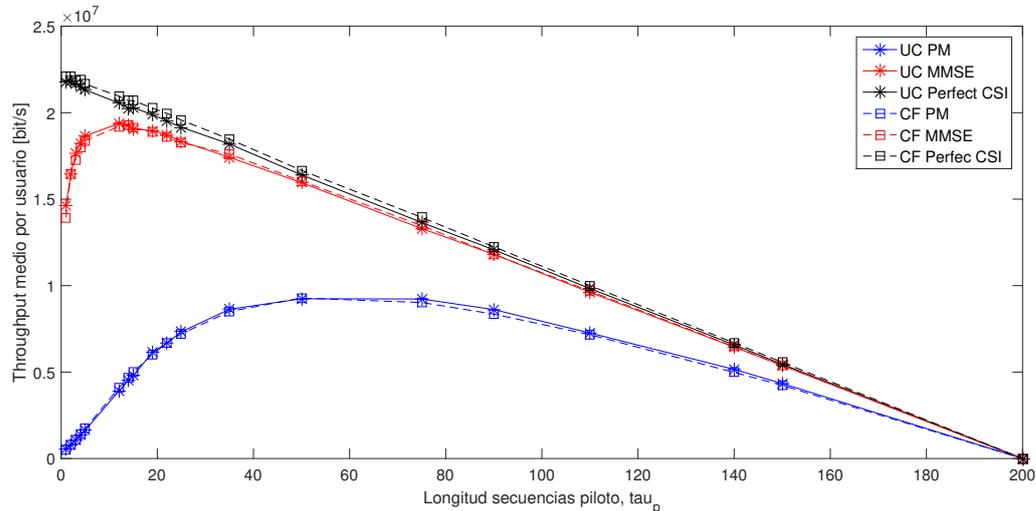


Figura 3.8: *Throughput* medio por usuario en función de τ_p en CF y UC en el *downlink*

En el *downlink* las arquitecturas CF y UC presentan resultados similares utilizando cualquiera de los estimadores de canal, sin embargo, de nuevo se aprecia la diferencia del *throughput* medio disponible por usuario conseguido con S-LMMSE y PM. Por una parte, en UC con PM, el valor de τ_p óptimo en cuanto al *throughput* medio por usuario

en el *downlink* está entorno a 50 muestras con lo que se obtienen 9,27 Mbit/s. Debido a que la asignación de pilotos es aleatoria y hay $K=30$ MSs, son necesarias más secuencias piloto que usuarios para obtener la menor contaminación de pilotos posible, mientras que si la asignación de pilotos no fuera aleatoria, el valor óptimo de τ_p coincidiría con K , ya que se asignaría una secuencia ortogonal a cada usuario. A pesar de que las curvas de CF y UC con PM son muy parecidas, el *throughput* obtenido con UC supera en algunos Kbits/s al obtenido con CF. Por otra parte, con S-LMMSE en UC, el valor óptimo son $\tau_p = 12$ muestras, resultando en un *throughput* medio por usuario de 19,2 Mbit/s. Finalmente se puede observar que para valores cercanos al 0, con cualquier estimador, el *throughput* obtenido por un usuario tiende a 0 Mbit/s. Esto se debe a que si la duración de la fase de entrenamiento es muy corta, el error entre la estimación del canal calculada en los APs y el canal real es muy grande y por lo tanto la precodificación que realizan los APs para enviar los datos a cada usuario no es correcta, resultando en un *throughput* medio por usuario que tiende a 0 Mbit/s, mientras que cuanto más dura la fase de entrenamiento, menos duran las fases de *downlink* y *uplink* y por lo tanto menos información útil es transmitida resultando en un *throughput* medio por usuario que también tiende a 0 Mbit/s.

Por otra parte, en la transmisión de *uplink* (Figura 3.9), UC obtiene mejores resultados que CF en cuanto al *throughput* por usuario, con ambos estimadores de canal. Con PM, el valor que optimiza el *throughput* por usuario es $\tau_p = 35$ muestras, obteniendo 10,56 y 8,38 Mbit/s en UC y CF, respectivamente. Es decir, con UC se obtiene aproximadamente un 23% más de *throughput* medio por usuario que con CF. Con S-LMMSE, el *throughput* máximo disponible por usuario se consigue con $\tau_p = 5$, resultando en 15,7 y 14,9 Mbit/s con UC y CF, respectivamente.

Finalmente, en la Figura 3.9 se muestra como los resultados obtenidos con el estimador de canal PM, a medida que τ_p crece, se acercan a los obtenidos con S-LMMSE. Como ya se ha explicado, esto es debido a que cuanto mayor es τ_p más secuencias ortogonales disponibles hay, y menor es el efecto de la contaminación de pilotos, permitiendo que la transmisión de información útiles sea más efectiva.

3.3.2 Capacidad de Fronthaul

En la Figura 3.10 se muestran los resultados obtenidos en función de τ_p . De nuevo se observa una clara diferencia entre los resultados obtenidos en CF y UC. Además, se aprecia la relación entre esta figura y la Figura 3.8: la capacidad de *fronthaul* requerida por AP máxima en UC es cuando $\tau_p = 50$ y $\tau_p = 12$ (utilizando PM y S-LMMSE respectivamente) mientras que en CF es cuando $\tau_p = 50$ en PM y $\tau_p = 15$ en S-LMMSE, es decir, cuando los usuarios disponen de mayor *throughput*.

Utilizando PM (curvas de color azul) y con $\tau_p = 50$, la capacidad de *fronthaul* media necesaria por AP son 280,4 Mbit/s en CF y 56,29 Mbit/s en UC: un AP en CF necesita casi cinco veces más capacidad para servir a los usuarios que un AP en UC. Si se utiliza S-LMMSE (curvas de color rojo) para calcular la estimación de los canales la diferencia es menor, pero la capacidad necesaria es mucho mayor. En CF cuando $\tau_p = 15$, la capacidad necesaria en un AP son 574,8 Mbit/s mientras que en UC cuando $\tau_p = 12$

3.4. Resultados en función del número de usuarios servidos

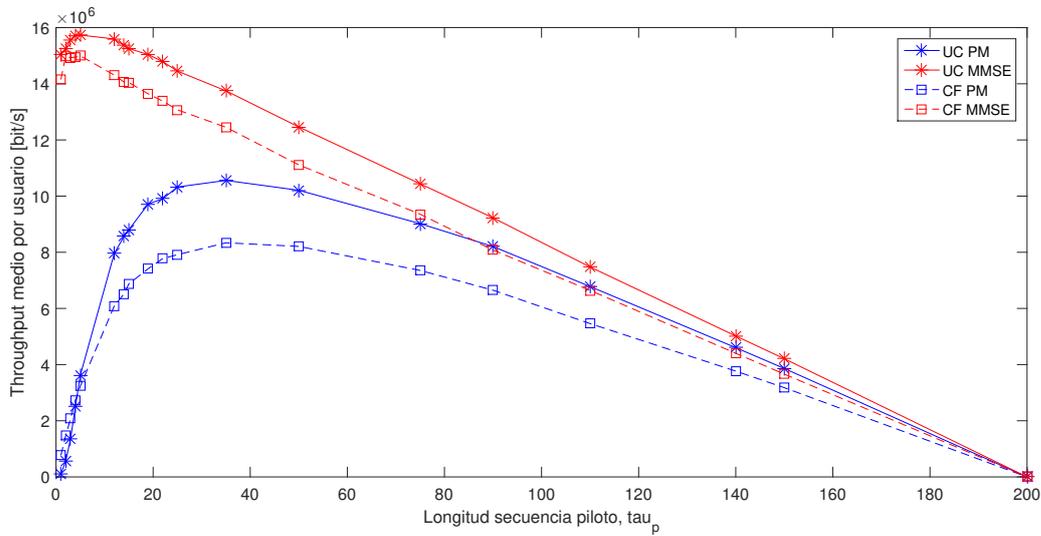


Figura 3.9: *Throughput* medio por usuario en función de τ_p en CF y UC en el *uplink*.

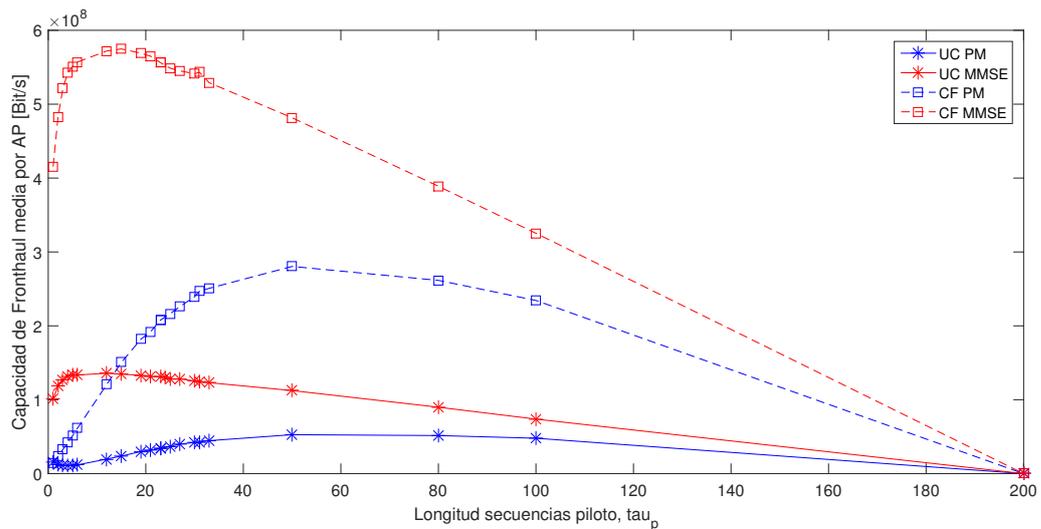


Figura 3.10: Capacidad de *fronthaul* media necesaria por AP en función de τ_p en CF y UC.

son 135,9 Mbit/s, es decir, en CF se necesita disponer de una capacidad de *fronthaul* unas cuatro veces superior a la necesaria en UC.

3.4 Resultados en función del número de usuarios servidos

3.4.1 Throughput

El número de usuarios a los que un AP da servicio es un factor que marca la diferencia entre la arquitectura UC y la CF. Como se ha visto hasta ahora, estas dos arquitecturas obtienen resultados muy similares en cuanto al *throughput* medio que acaba teniendo

3. RESULTADOS

disponible el usuario final. Las Figuras 3.11 y 3.13 muestran la *fda* de este *throughput* obtenida a partir del mismo escenario simulado en la Figura 3.4, es decir, $M = 100$, $K = 30$, $p_{downlink} = 200$ mW, $p_{uplink} = 100$ mW, $\tau_c = 200$ muestras y $\tau_p = 15$ muestras. Además, para UC $N = 5$ y para CF $N = K$.

En la Figura 3.11 se muestran los resultados del *downlink*. Con ninguno de los tres estimadores de canal se aprecia una ventaja significativa de una arquitectura respecto a la otra en cuanto al *throughput* por usuario. Por otra parte, como ya se ha comentado anteriormente, los resultados obtenidos con S-LMMSE son mucho mejores que los obtenidos con PM. En la Figura 3.12 se muestran los resultados obtenidos en función de N para el *downlink*. Tal y como ya se ha dicho, los resultados del *throughput* por usuario son prácticamente iguales en UC y CF a pesar del valor de N . Se debe tener en cuenta que, en ambas arquitecturas, la asignación de potencia que realizan los APs a los usuarios que sirven se hace de manera proporcional al canal de propagación existente hacia estos usuarios: cuanto mayor es el coeficiente de la estimación de un canal calculada por los APs, mayor potencia de transmisión se asignan sobre dicho canal. Por lo tanto, se puede entender que CF y UC tengan un comportamiento parecido desde el momento que en CF se asigna una mayor potencia de transmisión a los usuarios con '*mejor*' canal de propagación, mientras a los usuarios con '*peor*' canal de propagación se les asigna poca potencia de transmisión; de forma parecida en UC solamente se les asigna potencia de transmisión a los N usuarios con '*mejor*' canal mientras que a los usuarios con un '*peor*' canal de propagación no se les asigna potencia de transmisión.

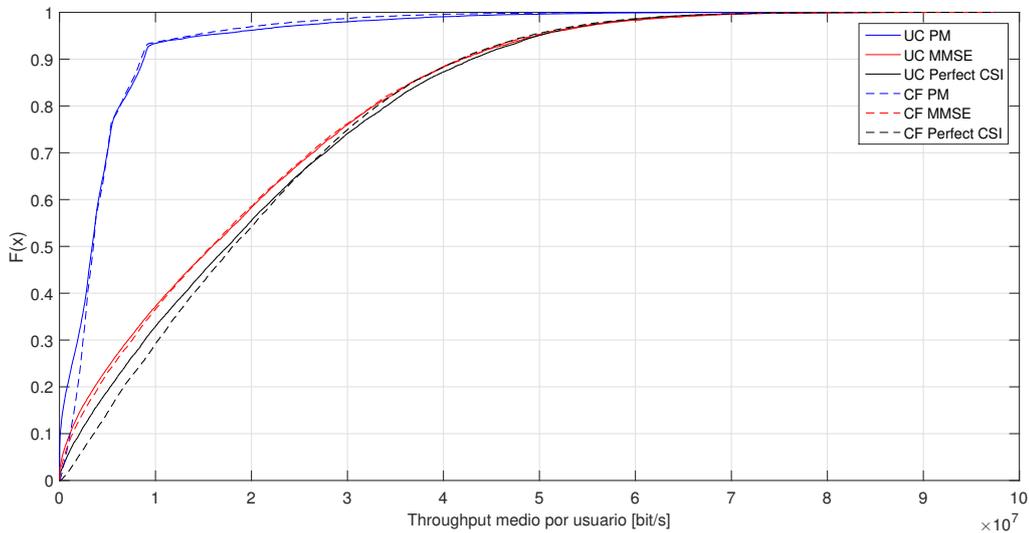


Figura 3.11: Función de distribución acumulada del *throughput* medio por usuario en CF y UC en el *downlink*.

En el caso del *uplink* (Figura 3.13) sí que se muestra una mayor diferencia entre los resultados de las dos arquitecturas. Con PM como estimador de canal, gran parte de los usuarios obtienen mayor *throughput* con UC y en ambas arquitecturas el 50% de los usuarios disponen como máximo de 1,06 Mbit/s, mientras que solamente un

3.4. Resultados en función del número de usuarios servidos

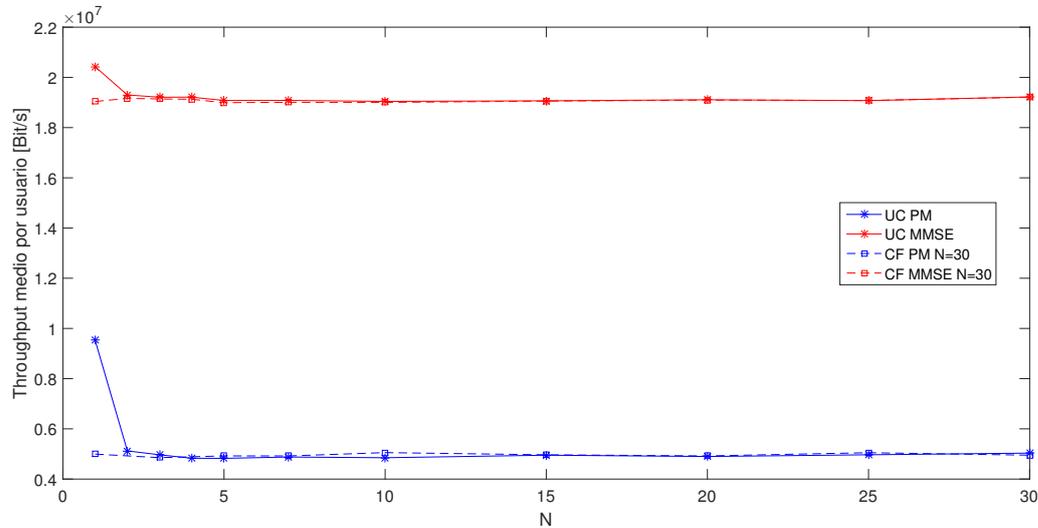


Figura 3.12: *Throughput* medio por usuario en función de N en UC en *downlink*.

10% de usuarios disponen de más de 25 y 30 Mbit/s en CF y UC, respectivamente. Con S-LMMSE los resultados de UC muestran que todos los usuarios obtienen mejor *throughput* que con CF, además de que estos resultados son prácticamente los mismos que los conseguidos teniendo en cuenta *Perfect CSI*. Con este estimador, el *throughput* medio por usuario obtenido por el 50% de los usuarios supera los 9,5 Mbit/s en UC frente a los 7,9 Mbit/s en CF.

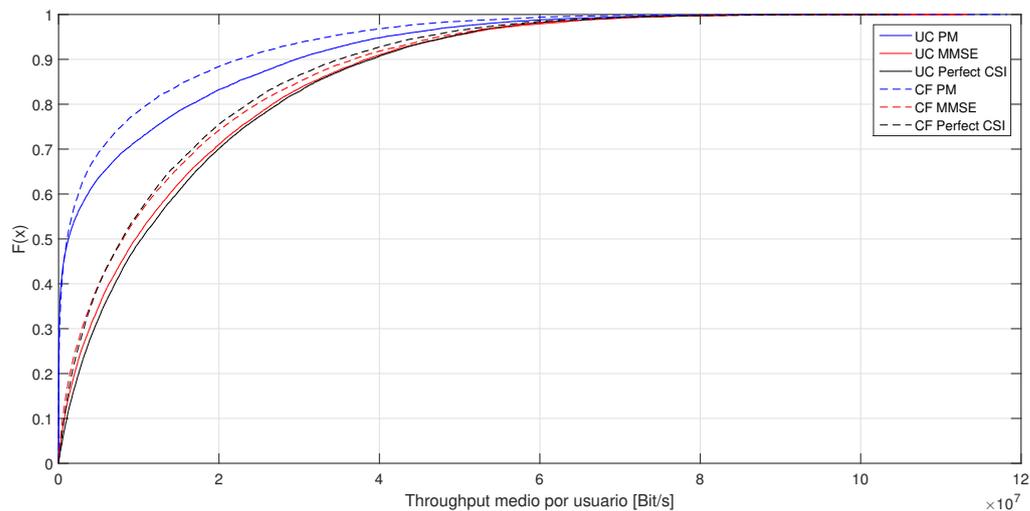


Figura 3.13: Función de distribución acumulada del *throughput* medio por usuario en CF y UC en el *uplink*.

En la Figura 3.14 se muestran los resultados del *throughput* en función de N para el *uplink*. Como en el caso del *downlink*, a medida que N aumenta los resultados de UC

3. RESULTADOS

se asemejan más a los de CF, sin embargo, ahora el *throughput* por usuario obtenido en UC cuando el estimador de canal es PM supera al obtenido en CF hasta que $N \approx 23$, mientras que si se usa S-LMMSE, UC es mejor hasta que a partir de $N \approx 15$ se igualan las dos arquitecturas. Para $N = 5$, el *throughput* medio por usuario cuando se usa PM son 8,76 y 6,73 Mbit/s en UC y CF, respectivamente, mientras que si se usa S-LMMSE los resultados son 15,35 y 13,88 Mbit/s, respectivamente: tal y como se muestra en la Figura 3.13 de la *fda*, los resultados de UC son ligeramente superiores a los de CF en el escenario analizado. Por otra parte se puede observar que para $N \leq 3$, el valor del *throughput* medio por usuario es muy bajo: 5,6 Mbit/s para $N=1$. Esto es debido a que cuando el valor de N es tan bajo, hay bastantes usuarios que no son servidos por ningún AP. Consecuentemente, el resultado del promedio entre los usuarios servidos y los que no son servidos, se ve afectado por los que no son servidos. Para $N=2$, sigue habiendo usuarios que no están servidos, pero el número de MSs que sí que son servidas es superior y por lo tanto el valor del promedio aumenta.

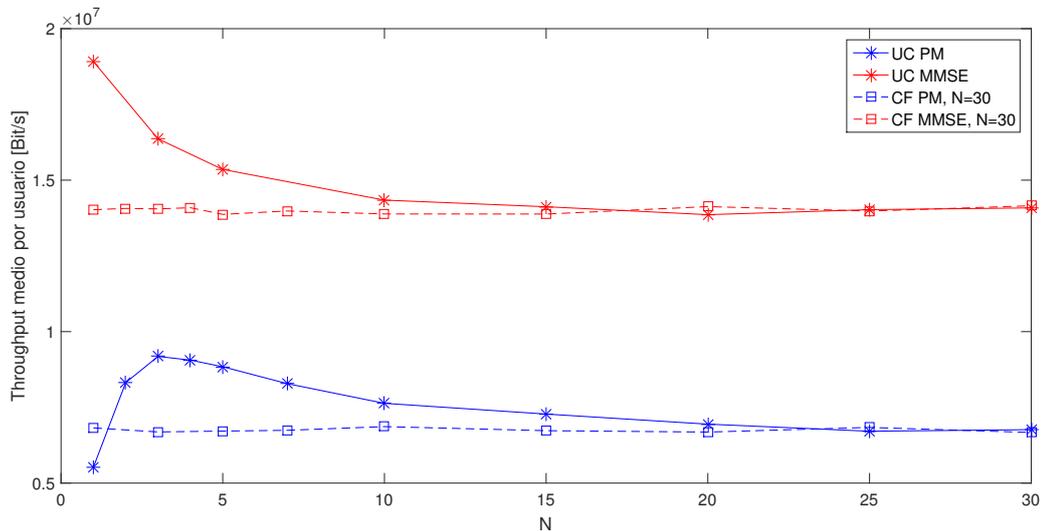


Figura 3.14: *Throughput* medio por usuario en función de N en UC en el *uplink*.

A continuación se analizan los resultados de la capacidad de *fronthaul* que necesitan los APs del sistema para dar servicio a N usuarios, donde N va desde 1 hasta 30 (máximo número de usuarios del sistema).

3.4.2 Capacidad de Fronthaul

En la Figura 3.15 se analiza la capacidad del *fronthaul* necesaria en un AP en función de N . En el apartado anterior ya se ha dicho que el *throughput* que los usuarios obtienen en una arquitectura u otra son muy similares y no se aprecia ninguna ventaja significativa en una de las dos. Sin embargo, debido a su funcionamiento, UC se demuestra claramente ventajosa respecto a CF en cuanto a la capacidad de la que necesitan disponer los APs para dar servicio a los usuarios. Es evidente que si $N=1$, la capacidad necesaria en un AP es muy baja, pero realmente no tiene mucho sentido que un AP de servicio solamente a un usuario. Por otra parte, si $N=30$, la capacidad necesaria es la misma que en CF ya que como se ha dicho anteriormente, CF se puede considerar un caso particular de UC donde $N=K$.

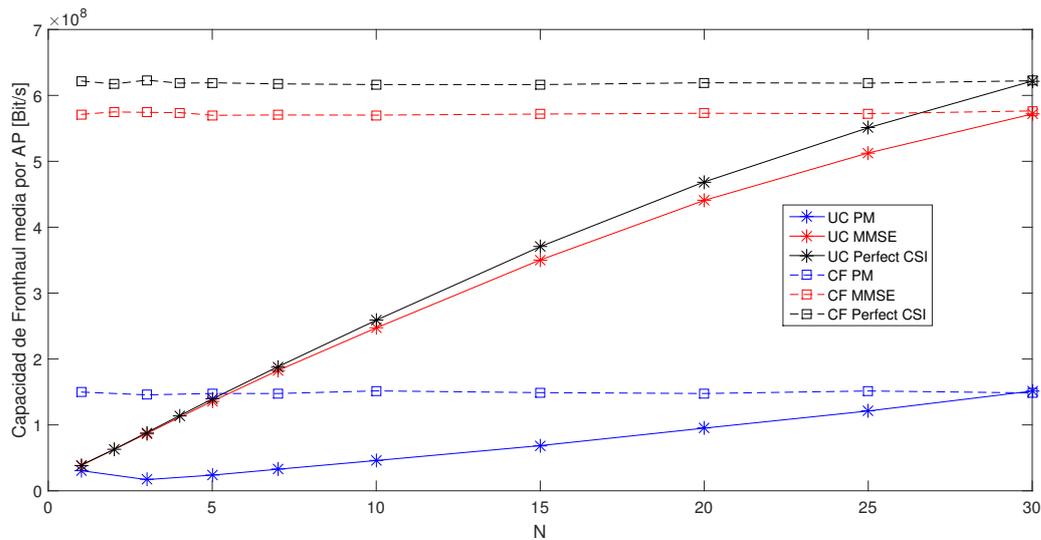


Figura 3.15: Capacidad de *fronthaul* media necesaria por AP en UC y UC2.

Para el caso concreto $N=5$, la capacidad necesaria utilizando PM son 23,79 Mbit/s en UC y 147,7 Mbit/s en CF: aproximadamente siete veces menos capacidad necesaria en UC que en CF. Si por el contrario se utiliza S-LMMSE para estimar los canales de propagación, la capacidad necesaria en UC son 139,3 Mbit/s mientras que en CF son 569,80 Mbit/s, es decir, alrededor de un 410% de capacidad necesaria más en CF que en UC. Analizando estos resultados, se ve claramente la ventaja de dar servicio a un número reducido de usuarios frente a todos los usuarios.

CONCLUSIONES

En este TFG se han comparado dos propuestas de arquitecturas a nivel de capa física que se plantean para la futuras redes de telecomunicaciones 5G como son *Cell Free Massive MIMO* y la variante *User Centric*.

En primer lugar, ambas arquitecturas presentan unas prestaciones muy similares en cuanto a la tasa de transmisión que se ofrece a los usuarios tanto para el *uplink* como para el *downlink*. Sin embargo, se pueden observar ventajas de una arquitectura respecto a la otra dependiendo del parámetro del sistema que se ha analizado. En general, la tasa de transmisión en el *downlink* es muy parecida en CF y UC. Por otra parte, UC consigue una tasa de transmisión ligeramente mayor en el *uplink* con cualquiera de los estimadores de canal. Esto se debe a que un AP solamente proporciona servicio a los usuarios cuyo canal de propagación presenta mejores características, cosa que permite que estos usuarios consigan tener una tasa de transmisión mayor. A diferencia de UC, en CF un AP proporciona servicio a todos los usuarios a pesar de que las características del canal de propagación no sean 'buenas', resultando en un *throughput* inferior para esos usuarios. De hecho, como ya se ha comentado en los anteriores capítulos de este proyecto, la tasa de transmisión que se obtiene no es el parámetro que marca la diferencia entre estas dos arquitecturas, ya que en la mayoría de los casos las diferencias con respecto a esta métrica son prácticamente insignificantes.

En segundo lugar, se han comparado estas dos arquitecturas en relación a la capacidad de *fronthaul* necesaria en cada uno de los APs del sistema para dar servicio a los usuarios. Como era de esperar, dado el funcionamiento básico de estas dos arquitecturas, UC presenta una clara ventaja sobre la arquitectura *Cell Free Massive MIMO*. Debido a que un AP en UC solamente sirve a un número reducido de usuarios del sistema, la capacidad de *fronthaul* que necesita es mucho menor que la que necesita un AP en CF ya que en esta un AP tiene que dar servicio a todos los usuarios de la red. Se ha comprobado que a medida que el número de usuarios a los que tiene que servir un AP en UC aumenta, las prestaciones de la arquitectura se van aproximando a CF ya que como se ha dicho anteriormente, CF se puede considerar un caso particular de UC. Gracias a UC, la cantidad de tráfico que circula a través de la red de *fronthaul*

4. CONCLUSIONES

que conecta a los APs con la CPU se reduce en un factor que depende del número de usuarios a los que sirve cada AP. Este hecho marca la principal diferencia entre las dos arquitecturas y hace que UC se presente como la mejor de las dos propuestas.

Por último, también se ha llevado a cabo una comparación entre UC y una propuesta variante de ésta denominada UC2. Para esta propuesta, se ha asumido que un AP conoce a las MSs a las que debe proporcionar servicio. Sin embargo, en un entorno real, los APs no disponen de esta información por sí solos, sino que es la CPU la que indica a cada AP los usuarios a los que debe dar servicio. Por lo tanto, sería necesario dedicar una porción del tiempo de trama para llevar a cabo este proceso de asignación de usuarios por parte de la CPU. Este hecho supone una menor porción de tiempo de trama dedicado a la transmisión de información útil y consecuentemente, las prestaciones de la arquitectura empeorarían. También se ha podido observar que con esta arquitectura no se consigue aprovechar el despliegue de un gran número de APs, ya que muchos de ellos no proporcionan servicio a ninguna MS.

Concluyendo, se ha comprobado que la arquitectura UC presenta mejores resultados que la arquitectura CF en relación al *throughput* del *uplink* obtenido por la gran mayoría de los usuarios, mientras que estos resultados en el *downlink* son prácticamente los mismos en ambas arquitecturas. También se ha comprobado que la principal diferencia entre estas dos arquitecturas es la capacidad de *fronthaul* necesaria en los APs de cada una de ellas para dar servicio a los usuarios, siendo mucho mejores los resultados obtenidos con la arquitectura UC.

A pesar de lo que se ha analizado en este TFG, hay muchos aspectos que se tienen que estudiar para proponer UC como la arquitectura de las futuras redes de telecomunicaciones. En primer lugar, en todo el TFG se asume que la capacidad de *fronthaul* disponible es ilimitada, cuando en realidad, la información que viaja por esta red de *fronthaul* se debería cuantificar. El estudio de los efectos de la limitación del *fronthaul* sería una línea futura de trabajo muy interesante. En segundo lugar, se ha asumido que no existe ningún tipo de transmisión de pilotos de entrenamiento por parte de los APs de la red. Considerar los efectos sobre las prestaciones de UC de esta fase de transmisión de pilotos por parte de los APs sería otro aspecto a tener en cuenta. Finalmente, también se ha asumido que se intenta servir a todos los usuarios en cada instante de tiempo. Combinar la arquitectura *Cell Free* con políticas de *scheduling* donde solo se sirve a un subconjunto de los usuarios sería otra idea a explorar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. L. Marzetta, “Massive mimo: an introduction,” *Bell Labs Technical Journal*, vol. 20, 2015. 1, 1
- [2] L. Carrasco, “Les xarxes de telefonía mòbil: Conceptes bàsics,” *Transparències Xarxes d’ Operadora*, 2014. 1
- [3] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, “An overview of massive mimo: Benefits and challenges,” *IEEE Journal of selected topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742–758, October 2014. 1, 2.1, 2.1.2
- [4] E. Björnson, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, “Massive mimo: Ten myths and one critical question,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 114–123, October 2016. 1
- [5] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, E. G. Yang, H. nnd Larsson, and T. Marzetta, “Cell-free massive mimo versus small cells,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1834–1850, March 2017. 1, 1, 2.1, 2.1.1, 2.1.1, 2.1.2
- [6] S. Buzzi and C. D’Andrea, “User-centric communications versus cell-free massive mimo for 5g cellular networks,” *21th International ITG Workshop on Smart Antenna*, pp. 1–6, March 2017. 1, 1, 1, 2.1, 2.1.1, 2.1.1, 2.1.1
- [7] Z. Jiang, A. F. Molisch, G. Caire, and Z. Niu, “Achievable rates of fdd massive mimo systems with spatial channel correlation,” *Trans. Wireless Commun.*, to be published. 1
- [8] M.-H. Golbon-Haghighi. Beamforming in wireless networks. [Online]. Available: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/53332.pdf>. 2.5 1
- [9] S. Zhou, M. Zhao, X. Xu, J. Wang, and Y. Yao, “Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 3, pp. 108–113, March 2003. 1
- [10] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, “Cell-free massive mimo: Uniformly great service for everyone,” *2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, pp. 201–205, July 2015. 2.1