

Mejora del rendimiento en redes B5G mediante estaciones base aéreas

Félix Vidarte, Carolina Gijón, Matías Toril, Fernando Ruiz, Marta Solera
{fvidarte, cgm, mtoril, ferv, msolera}@ic.uma.es

Telecommunication Research Institute (TELMA), Universidad de Málaga,
E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación, Bulevar Louis Pasteur 35, 29010, Málaga (Spain).

Abstract—The massive development of unmanned aerial vehicles has changed the landscape of mobile networks. Their great flexibility and speed of deployment make them the perfect tool for temporarily augmenting infrastructure to solve capacity problems caused by spot congestion. The joint use of Aerial Base Stations (ABSs) with legacy traffic steering techniques has captured the interest of mobile network operators. Nonetheless, an adequate ABS positioning is key for effectively operating these joint capacity enhancement schemes. This paper compares two ABS positioning algorithms based on user density and overlaps to enhance service level agreement (SLA) compliance. Strategies are assessed in an isolated way and combined with a load balancing (MLB) algorithm. Results show that an ABS positioning algorithm based on overlapping can make the most of the MLB algorithm, increasing by 15% the SLA compliance with the overall network.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las comunicaciones móviles han experimentado un gran desarrollo motivado por un aumento en la demanda de recursos por parte de los usuarios. Los nuevos servicios y aplicaciones requieren un mayor caudal de tráfico y menor latencia para proporcionar la calidad de experiencia (*Quality of Experience*, QoE) y acuerdo de nivel de servicio (*Server Level Agreement*, SLA) demandados por los usuarios de la red móvil y los arrendatarios de segmentos o *slices* respectivamente. Para mejorar el funcionamiento de la red utilizando la menor cantidad de recursos posibles, es necesario recurrir a algoritmos de optimización que permitan asignar los recursos a usuarios de manera eficiente. Actualmente, uno de los problemas más importantes en las redes celulares es la congestión eventual de la red de acceso radio (*Radio Access Network*, RAN), que provoca una degradación de la calidad de los servicios ofrecidos.

Para solucionar este problema, hasta ahora, los operadores de telefonía móvil han optado por realizar balance de carga (*Mobility load balance*, MLB) mediante optimización de los márgenes de traspaso (*HandOver Margin*, HOM) [1]. Sin embargo, este método solamente es efectivo si los recursos disponibles son mayores que los demandados en algunas celdas. En el caso contrario, tradicionalmente se ha optado por el despliegue momentáneo de infraestructura auxiliar, mediante vehículos terrestres o aumentando a largo plazo el número de estaciones base (*Base Station*, BS) en un mismo emplazamiento. Sin embargo, esta es una solución costosa, lenta y poco flexible.

El desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles*, UAVs), también conocidos como drones, ha llamado la atención de los operadores, que han visto una oportunidad de aprovechar sus cualidades en las

nuevas generaciones de comunicaciones móviles. [2] Uno de los principales usos de los UAVs es como estación base auxiliar en casos en los que la red móvil sufre una sobrecarga de demanda de tráfico, bien por un aumento de los usuarios como en el caso eventos multitudinarios o bien una disminución de la infraestructura como en el caso de desastres naturales o averías momentáneas. [3]. Algunas de sus características, como su gran movilidad, capacidad para evitar obstáculos o rapidez de despliegue, hacen que estos dispositivos puedan reemplazar el uso de infraestructura auxiliar terrestre. No obstante, al desplegar estaciones base aéreas (*Aerial Base Station*, ABS) utilizando UAVs, se debe hacer frente a algunas limitaciones en cuanto al uso de energía que implican una menor potencia de transmisión y reducido ancho de banda. En la bibliografía, existen numerosos artículos que abordan el problema de cómo dar servicio a drones como usuarios [4]. Otros trabajos estudian como posicionar ABSs en entornos sin infraestructura fija [5]. Sin embargo, hasta la fecha, no se ha propuesto ningún algoritmo de posicionamiento de ABSs que tenga en cuenta la aplicación simultánea de técnicas clásicas de MLB para repartir tráfico entre las estaciones base aéreas y terrestres.

En este artículo se analiza el rendimiento de dos algoritmos de posicionamiento de UAVs como ABS combinados con un esquema de MLB para mejorar el SLA global de la red. El objetivo es determinar el criterio que debe seguir un algoritmo de navegación de ABS para que, realizando el balance de tráfico adecuado, se maximice el cumplimiento de SLA de la RAN.

Este artículo se estructura de la siguiente manera. En la sección II se explican los distintos algoritmos propuestos. En la sección III se analiza su rendimiento empleando un simulador de red. Por último, en la sección IV se exponen las conclusiones finales y posibles trabajos futuros.

II. ESTRATEGIAS DE POSICIONAMIENTO Y AJUSTE DE PARÁMETROS DE ESTACIONES BASE AÉREAS

En esta sección, se explican diferentes alternativas para solucionar los problemas de sobrecarga puntual en la red.

A. Posicionamiento de ABS

Se comparan dos algoritmos alternativos de posicionamiento de ABSs.

1. *Posicionamiento basado en métricas de tráfico (P_{TA}):* El objetivo de este algoritmo es situar la ABS donde se concentran la mayor parte de los usuarios de la red. Para ello, se utilizan estadísticas de *Timing Advance* (TA), que indican como de lejos están el terminal móvil (*User Equipment*, UE) y

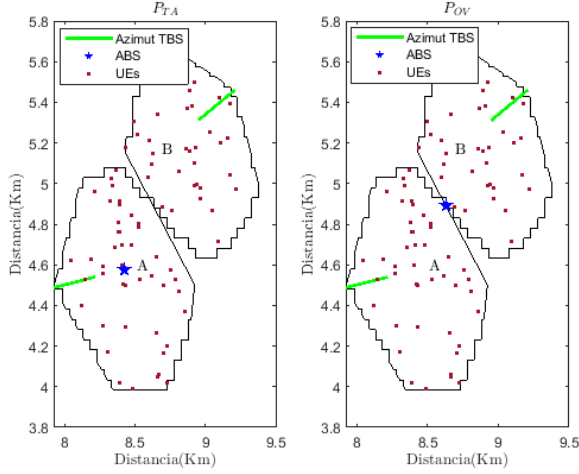


Fig. 1. Comparación de los diferentes algoritmos de posicionamiento.

su estación base (*Base Station*, BS) servidora [6]. La principal función de estos mensajes es optimizar la transmisión y recepción de mensajes de manera que se puedan utilizar el mayor número de recursos sin tener interferencia entre mensajes. La medida de TA proporciona un valor entre 0 y 63, indicando el anillo en el que se encuentra el UE que reporta esta medida. La anchura de un anillo en LTE es de 78,125 m. El algoritmo P_{TA} elige una posición que maximice el número de usuarios potenciales que la ABS podría servir por criterios de cobertura. Para ello, se sitúa la ABS en el centro del anillo de la red con mayor número de reportes de TA y alineado con el azimut de la BS a la que pertenece este anillo.

2. *Posicionamiento basado en solapamiento entre celdas* (P_{OV}): El objetivo es situar la ABS en una posición que maximice el área de solapamiento de la ABS con las estaciones base terrestres (*Terrestrial Base Station*, TBS) colindantes. El área de solapamiento se define como el área que puede llegar a cubrir una estación base si se ajustan los márgenes de traspaso. Específicamente, el área de solapamiento entre dos celdas i, j se calcula sumando el área en el que la diferencia de nivel de las señales piloto recibidas es inferior a un umbral Th_{RSRP} , que en este trabajo será de ± 7 dB. Así, un punto (x, y) se considera como superficie de solapamiento entre las celdas i y j cuando cumple que

$$|RSRP(i) - RSRP(j)| \leq Th_{RSRP}, \quad (1)$$

donde $RSRP(i)$ y $RSRP(j)$ son los niveles de señal piloto recibidos por un UE ubicado en la posición (x, y) desde la celda servidora i y la celda vecina j . El área de solapamiento depende tanto de la potencia recibida por la BS servidora como de la potencia recibida por las BS vecinas.

La figura 1 muestra el comportamiento de los algoritmos P_{TA} (izquierda) Y P_{OV} (derecha) para posicionar una ABS en un escenario en el que dos TBS, A y B, representadas por su azimut (línea verde) y área de servicio aproximada (línea negra), dan servicio a usuarios distribuidos espacialmente como indican los puntos rojos. En cada figura, la posición de la ABS se indica con una estrella azul. Mientras que P_{TA} sitúa la ABS en el centro del anillo con más usuarios, descargando una única celda, P_{OV} lo sitúa en una posición intermedia que

permitiría descongestionar cualquiera de las celdas existentes si se configuran adecuadamente los márgenes de traspaso.

B. Algoritmo de balance de carga

El algoritmo de MLB considerado en este trabajo está basado en [7]. El objetivo de este algoritmos es modificar los márgenes de traspaso con el fin de igualar el cumplimiento de SLA en las celdas de la red. Para que se produzca un traspaso de un usuario de una celda i a una celda j debe de cumplirse que

$$RSRP(j) > RSRP(i) + HOM(i, j). \quad (2)$$

El algoritmo de MLB de este trabajo se basa en reglas heurísticas, modificando el HOM por adyacencia en función de los estadísticos recopilados durante cierto periodo de tiempo, denominado Intervalo de Acción (IA). En cada IA k y adyacencia (i, j) , el $HOM(i, j)^k$ se modifica incrementalmente

$$HOM^{(k+1)}(i, j) = HOM^{(k)}(i, j) + \Delta HOM^{(k)}(i, j), \quad (3)$$

donde $\Delta HOM^{(k)}(i, j)$ se calcula como

$$\Delta HOM(i, j) = \begin{cases} -2 & \text{si } \overline{SLA}_{diff}(i, j) \leq \alpha_1, \\ 0 & \text{si } \alpha_1 \leq \overline{SLA}_{diff}(i, j) \leq \alpha_2, \\ 2 & \text{si } \overline{SLA}_{diff}(i, j) > \alpha_2. \end{cases} \quad (4)$$

$\overline{SLA}_{diff}(i, j)$ es la diferencia de cumplimiento de SLA entre las celdas i y j

$$\overline{SLA}_{diff}(i, j) = \overline{SLA}(j) - \overline{SLA}(i), \quad (5)$$

donde $\overline{SLA}(j)$ y $\overline{SLA}(i)$ son las medias del grado de cumplimiento de SLA para todos los UEs servidos por las celdas i y j respectivamente, calculado como

$$\overline{SLA}_i(i) = \frac{1}{N_u(i)} \sum_{u=1}^{N_u} \min\left(\frac{Thruput(u)}{Thruput_{target}(u)}, SLA_{max}\right), \quad (6)$$

donde $N_u(i)$ es el número de usuarios servidos por la celda i , $Thruput(u)$ es el caudal o *throughput* medio del usuario u y $Thruput_{target}(u)$ es la cantidad de bits objetivo para el servicio que demanda el usuario u . SLA_{max} es el nivel máximo de cumplimiento de SLA para evitar que los UEs que excedan el SLA dominen el proceso de ajuste.

El punto de equilibrio viene dado por la condición $\overline{SLA}_{diff}(i, j) = 0$, que indica que la media del cumplimiento de SLA de los usuarios de las celda i y j es igual.

III. ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO

En esta sección, primero se describe la metodología de validación de los algoritmos con un simulador de red y a continuación se analizan los resultados obtenidos.

A. Metodología Experimental

La validación se lleva a cabo en el simulador dinámico de nivel de sistema descrito en [7], cuyos parámetros principales vienen definidos en la tabla I. El estudio se centra en el enlace descendente (*Downlink*, DL) de una RAN 5G compuesta por 2 TBSs idénticas a las que se muestran en la Figura 1. Se observa que la principal diferencia entre TBS y ABS reside en la potencia de transmisión, antena y ancho de banda. La potencia de transmisión de la ABS es muy inferior a las de la

TABLA I
PARÁMETROS PRINCIPALES DE SIMULACIÓN.

Parámetro	Descripción
Resolución temporal	10 ms
Modo de transmisión	Duplexación por división de frecuencia
Modelo de propagación	Winner II - C2 Slow fading: log-normal $\sigma_{SF}=8$ dB, $d_c=50$ m
Modelo TBS	Antenas trisectoriales, MIMO 2x2, Potencia transmitida =49 dBm, BW=10 MHz
Modelo ABS	Antena helicoidale, $P_{TX}=35$ dBm, BW=5MHz
Modelo de servicio	Transferencia de ficheros (FTP)
Nº de UEs iniciales	50
Movilidad de usuarios	UEs estáticos
Configuración HO	HO intrafrecuencia basado en RSRP disparado por evento A3, $HOM(i, j)=3$ dB

TBS. Esto se compensa con unas condiciones de propagación mas favorables debido a la proximidad y a una mayor probabilidad de visión directa debido a la altura. Otra diferencia importante es la reducción del ancho de banda en la ABS, que conlleva una reducción de los recursos físicos (*Physical Resource Block*, PRB) que esta puede asignar a los usuarios que sirve (25 PRBs en la ABS frente a los 50 PRBs de las TBSs). A cambio, reducir el ancho de banda implica aumentar el nivel de RSRP con la misma potencia de transmisión. Por último, las ABS tienen una antena helicoidal, frente a las antenas trisectoriales de las TBS. La antena helicoidal es menos directiva, y por tanto, tiene menos ganancia pero mayor ancho de haz.

Se establece la duración de un IA en 5 s. La duración total de cada prueba será de 32 IAs (2 min y 40 s). En los primeros 8 IAs, se mantienen los usuarios iniciales para obtener unas condiciones estables en la simulación. A continuación, durante un periodo de 12 IAs, se generan nuevos UEs con duración de sesión arbitraria en la celda B. Por último, se aumenta el número de UEs de la celda A, manteniendo constante el numero de UEs de la celda B.

Los métodos comparados son:

- **Base:** No se aplica ningún algoritmo de optimización, teniendo únicamente las dos celdas terrestres (TBS) para satisfacer la demanda de tráfico originada por los UEs.
- **MLB-TBS:** Algoritmo de balance de carga heurístico entre TBSs.
- **ABS- P_{TA} :** Partiendo del caso anterior, se añade la ABS en el centro del anillo de TA con más usuarios. Se mantiene el algoritmo de MLB entre las TBSs.
- **ABS- P_{TA} + MLB:** Al caso anterior, se añade el algoritmo de MLB entre TBSs y ABS.
- **ABS- P_{OV} :** Al caso MLB-TBS se le añade una ABS con una posición de máximo solapamiento.
- **ABS- P_{OV} + MLB:** Al caso anterior, se añade el algoritmo de MLB entre las TBSs y la ABS.

La principal cifra de mérito es la media del SLA de todos los usuarios de la red, calculado según

$$\overline{SLA} = \frac{1}{N_{uT}} \sum_{u=1}^{N_{uT}} \min\left(\frac{Thru(u)}{Thru_{target}(u)}, SLA_{max}\right), \quad (7)$$

evaluada a lo largo de los IAs de la simulación. N_{uT} es el

numero total de UEs que hay en la red.

B. Resultados

La figura 2 muestra la evolución de la cifra de mérito definida anteriormente a lo largo de la simulación para cada estrategia, normalizada respecto al caso base (SLA_{norm}). En primer lugar, cabe destacar la ligera degradación del grado de cumplimiento del SLA al aplicar el algoritmo de MLB entre las TBSs. Como la red se encuentra congestionada y los recursos disponibles son inferiores a los recursos demandados por los UEs, el reparto de trafico por sí solo no es suficiente para solucionar el problema de congestión de la red. Es necesario aumentar los recursos disponibles mediante el despliegue de infraestructura.

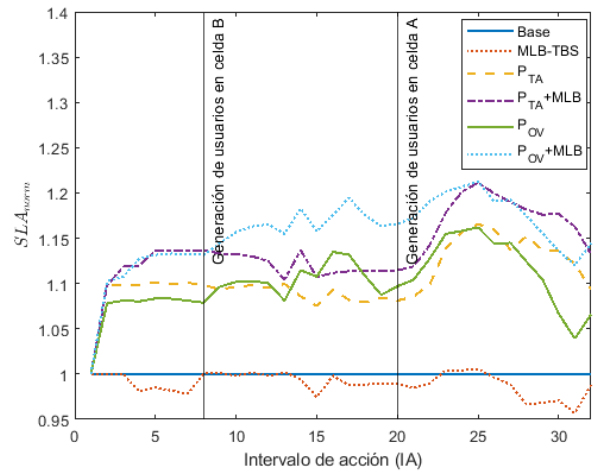


Fig. 2. Evolución del cumplimiento de SLA para diferentes estrategias.

A continuación observamos que las estrategias donde solamente se incluye una ABS (**ABS- P_{TA}** y **ABS- P_{OV}**) mejoran claramente el caso base. Al añadir una nueva estación base aumentan los recursos disponibles en la red, lo que se traduce en una mejora del cumplimiento de SLA global de la red. Al principio de la simulación, el posicionamiento definido por el algoritmo P_{TA} supera al posicionamiento definido por el algoritmo P_{OV} debido a que P_{TA} se basa en la distribución inicial de UEs para elegir la posición en la que mas UEs puede cubrir. Sin embargo, cuando empiezan a generarse usuarios en la celda B, la estrategia P_{OV} supera a P_{TA} , ya que tal y como muestra la figura 1, P_{TA} sitúa la ABS sobre la celda A. Por este motivo en la parte final de la simulación, donde se generan usuarios en la celda A, el algoritmo de posicionamiento P_{TA} vuelve a superar a P_{OV} .

Por último, el análisis se centra en las estrategias en las que además de posicionar una ABS se añade un algoritmo de MLB (**ABS- P_{TA} + MLB** y **ABS- P_{OV} + MLB**). En este caso, al contrario que la comparación de el caso Base y MLB-TBS, el aumento de los recursos disponibles permite que realizar balance de carga implique un aumento del cumplimiento de SLA global de la red. De hecho, para ambas estrategias de posicionamiento el MLB mejora la estrategia sin MLB (es decir P_{TA} y P_{OV} , respectivamente). No obstante, se observa que el uso de MLB mejora más la estrategia de posicionamiento P_{OV} , debido a que el algoritmo P_{OV} sitúa la

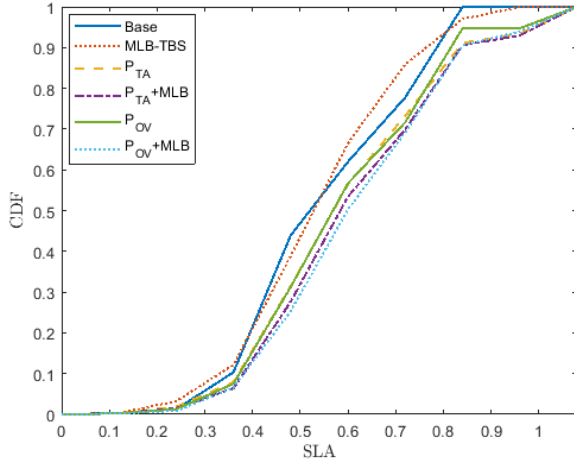


Fig. 3. CDF del grado de cumplimiento de SLA agregado a lo largo de toda la simulación.

ABS en la posición que maximiza el solapamiento (es decir, donde actúa el MLB). Al final de la simulación, cuando los usuarios son generados en la celda A, la estrategia ABS- P_{TA} + MLB consigue un cumplimiento de SLA algo más alto, ya que la ABS se posiciona sobre la celda A. Sin embargo, cuando se generan usuarios en la celda B, ABS- P_{OV} + MLB es notablemente mejor que ABS- P_{TA} + MLB. Esto se debe a que el algoritmo de posicionamiento P_{OV} permite descongestionar ambas celdas, mientras que el algoritmo P_{TA} solo permite descongestionar una de las celdas.

En la tabla II se muestra el grado de cumplimiento del SLA global, promediado a lo largo de toda la simulación y normalizado con respecto al caso base. Como se ha comentado anteriormente, la estrategia MLB-TBS empeora un 1 % el rendimiento del caso base. P_{TA} y P_{OV} mejoran el rendimiento en aproximadamente un 10 %, siendo P_{TA} ligeramente superior (0,5 %). Sin embargo, el uso de MLB sobre P_{OV} supone una ganancia adicional del 5,4 %, convirtiendo a ABS- P_{OV} + MLB en la mejor estrategia, con un aumento relativo del 15,2 % en el cumplimiento del SLA sobre el caso base.

En la figura 3 se representa la función de densidad de probabilidad acumulada del grado de cumplimiento de SLA para todas las conexiones que se cursan durante la simulación. El efecto de utilizar MLB puede observarse comparando el caso base (curva azul) y la estrategia MLB-TBS (curva naranja). La curva naranja es más vertical que la azul, lo que significa que las diferencias entre los grados de cumplimiento de SLA de los usuarios de la red son menores. El resto de estrategias mantienen la verticalidad, ya que todas utilizan MLB entre las TBS. Sin embargo, sufren un desplazamiento hacia la derecha, lo que significa una disminución del porcentaje de UEs para los que no se cumple el SLA. De nuevo, la mejor estrategia es ABS- P_{OV} + MLB, ya que es la curva que está más a la derecha.

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El uso de UAVs como ABSs en redes móviles permite reducir los problemas de congestión eventuales de manera más económica y flexible. El despliegue de una ABS en un escenario congestionado permite aumentar los recursos

TABLA II
COMPARACIÓN DEL SLA PROMEDIO NORMALIZADO

Simulación	SLA medio normalizado
Base	1
MLB-TBS	0.989
ABS P_{TA}	1.103
ABS P_{TA} + MLB	1.135
ABS P_{OV}	1.098
ABS P_{OV} + MLB	1.152

disponibles incrementando el nivel de acuerdo de SLA de la red global. En este artículo se proponen dos algoritmos de posicionamiento de ABSs combinados con un algoritmo de MLB. Los resultados muestran un aumento similar del nivel de acuerdo de SLA global de la RAN cuando posicionamos una ABS. El rendimiento de ambos algoritmos de posicionamiento es similar. Sin embargo, cuando se combinan estos algoritmos con un MLB el rendimiento mejora un 15,2 % para P_{OV} mientras que un 13,5 % para P_{TA} . Por lo tanto, la mejor estrategia para combatir la congestión momentánea de la red es ABS- P_{OV} + MLB.

Este trabajo nos permite conocer la influencia de la posición a la hora de desplegar una nueva ABS en una red celular. Como líneas futuras se propone desarrollar un algoritmo de navegación de UAV basado en aprendizaje por refuerzo profundo (*Deep Reinforcement Learning*, DRL) combinado con MLB para optimizar el funcionamiento de la red. En lugar de elegir solamente una posición inicial, un algoritmo de navegación permitiría ajustar la posición del UAV con el tiempo. En vista de los resultados obtenidos parece razonable pensar que este algoritmo de navegación debe de estar basado en solapamiento, ya que un algoritmo de posicionamiento basado en solapamiento maximiza el rendimiento de algoritmo de MLB.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2021-122217OB-I00/AEI/10.13039/501100011033) y la Unión Europea.

REFERENCIAS

- [1] C. Gijón, T. Mahmoodi, S. Member, M. Toril, S. Luna-Ramírez, and J. L. Bejarano-Luque, "SLA-Driven Traffic Steering in B5G Systems with Network Slicing," *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, vol. XX, p. 1, 2015.
- [2] G. Geraci, A. Garcia-Rodríguez, M. M. Azari, A. Lozano, M. Mezzavilla, S. Chatzinotas, Y. Chen, S. Rangan, and M. D. Renzo, "What Will the Future of UAV Cellular Communications Be? A Flight from 5G to 6G," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 24, no. 3, 2022.
- [3] M. Deruyck, J. Wyckmans, L. Martens, and W. Joseph, "Emergency ad-hoc networks by using drone mounted base stations for a disaster scenario," *2016 IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 11 2016.
- [4] N. González Serrato, M. Solera Delgado, F. Ruiz Vega, C. Gijón Martín, and M. Toril Genovés, "A quality of experience evaluation methodology for first-person-view drone control in cellular networks," *dl.acm.org*, pp. 59–66, 10 2022.
- [5] Y. Y. Munaye, H. P. Lin, A. B. Adege, and G. B. Tarekegn, "UAV Positioning for Throughput Maximization Using Deep Learning Approaches," *Sensors 2019, Vol. 19, Page 2775*, vol. 19, p. 2775, 6 2019.
- [6] Z. Shakir, J. Zec, I. Kostanic, A. A.-T. I. J. o. . . . , and u. 2023, "User equipment geolocation depended on long-term evolution signal-level measurements and timing advance," *academia.edu*.
- [7] C. Gijon, M. Toril, and S. Luna-Ramirez, "Data-Driven Estimation of Throughput Performance in Sliced Radio Access Networks via Supervised Learning," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 20, pp. 1008–1023, 6 2023.