



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La universidad católica de Loja

AREA TÉCNICA

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE TITULACIÓN

Cooperación entre drones usando un juego de coalición en una red celular

Autor: Ordoñez Pacheco, Brayan Bolivar

Directora: Rohoden Jaramillo, Katty Alexandra

LOJA - ECUADOR

2021



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2021

Aprobación del director del Trabajo de Titulación

Loja 30 de septiembre del 2021

Doctor

Francisco Sanvodal Noreña

Coordinador de la Titulación de Telecomunicaciones

Ciudad.-

De mi consideración:

El presente Trabajo de Titulación denominado: Cooperación entre drones usando un juego de coalición en una red celular realizado por Brayan Bolivar Ordoñez Pacheco ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo. Así mismo, doy fe que dicho Trabajo de Titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Firma del Director del Trabajo de Titulación

Katty Alexandra Rohoden Jaramillo.

C.I.: 1104107907

Declaración de autoría y cesión de derechos

“Yo, Brayan Bolivar Ordoñez Pacheco, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

Ser autor(a) del Trabajo de Titulación denominado: Cooperación entre drones usando un juego de coalición en una red celular, de la Titulación Electrónica y telecomunicaciones, específicamente de los contenidos comprendidos en: Capítulo 1. Estado del arte, Capítulo 2. Metodología, Capítulo 3. Algoritmo de formación de grupos SBUG, Capítulo 4. Resultados y discusión, Conclusiones y Recomendaciones, siendo Katty Alexandra Rohoden Jaramillo director (a) del presente trabajo; y, en tal virtud, eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual. Además, ratifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo son de mi exclusiva responsabilidad.

- Que mi obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.
- Autorizo a la Universidad Técnica Particular de Loja para que pueda hacer uso de mi obra con fines netamente académicos, ya sea de forma impresa, digital y/o electrónica o por cualquier medio conocido o por conocerse, sirviendo el presente instrumento como la fe de mi completo consentimiento; y, para que sea ingresada al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Autor: Brayan Bolivar Ordoñez Pacheco

C.I.: 1104877772

Dedicatoria

El presente trabajo de titulación le dedico principalmente a Dios quien fue guía en mi camino de formación universitaria brindándome fuerza y constancia día a día.

A mi familia que siempre me apoyaron con su amor y consejo alentándome a cumplir mi meta.

Brayan Ordoñez

Agradecimiento

A toda mi familia por el aliento y amor que me brindaron para realizarme como profesional.

A la Dra. Katty Rohoden por ser una excelente docente, por guiarme y orientarme en el desarrollo de este trabajo de titulación.

A mis amigos, compañeros por el apoyo, confianza, y carisma que mostraron.

Brayan Ordoñez

Índice de Contenido

Carátula	I
Aprobación del director del Trabajo de Titulación	II
Declaración de autoría y cesión de derechos	III
Dedicatoria	V
Agradecimiento	VI
Índice de Contenido	VII
Resumen	1
Abstract	2
Introducción	4
Capítulo uno	6
Estado del arte	6
1.1 Red celular heterogénea	6
1.2 Interferencia	7
1.2.1 <i>Interferencia cross-tier</i>	7
1.2.2 <i>Interferencia co-tier</i>	8
1.3 Capacidad de la red	9
1.4 UAV como estación base aérea	9
1.4.1 <i>UAV's de ala fija</i>	10
1.4.2 <i>UAV's de ala giratoria</i>	10
1.4.3 <i>Ventajas</i>	11
1.5 Teoría de juegos	11
1.5.1 <i>Juego de coalición con utilidad transferible</i>	13
1.5.2 <i>Relación de preferencia</i>	13
1.5.3 <i>Valor de Shapley</i>	14
1.5.4 <i>Estabilidad</i>	14
1.5.5 <i>Core</i>	14
1.6 Asignación de recursos	15
1.6.1 <i>Técnicas de gestión de recursos</i>	15
1.6.2 <i>Llenado de agua ponderada (WWF)</i>	16
1.7 Trabajos relacionados	17
Capítulo dos	19
Metodología	19
2.1 Modelo del sistema	20
2.2 Planteamiento del problema	20
2.3 Propuesta del juego coalicional	22
2.4 Estrategia del juego propuesto	23
2.4.1 <i>Recompensa</i>	23
2.4.2 <i>Valor de Shapley</i>	24
Capítulo tres	26

Algoritmo de agrupación basado en la teoría del juego	26
3.1 Algoritmo K-means para asignación de usuarios a UAV's	27
3.2 Algoritmo de formación de grupos GABGT	28
3.3 Algoritmo k-means para formación de grupos de UAV's	31
3.4 Algoritmo para asignación de recursos WWF	32
Capítulo cuatro	33
Resultados y discusión	33
4.1 Escenario sin agrupamiento de UAV's vs escenario agrupamiento de UAV's	34
4.2 Satisfacción de la red	36
4.3 Despliegue de UAV's y usuarios móviles	37
Conclusiones	39
Recomendaciones	41
Referencias	42
Apéndice	47
Apéndice 1:	47
Lista de abreviaturas	47
Apéndice 2:	49
Lista de símbolos	49

Índice de Tablas

Tabla 1 Configuración de parámetros iniciales 38

Tabla 2 Despliegue de UAV's y usuarios móviles..... 39

Índice de Figuras

Figura 1 Red celular heterogénea del escenario propuesto	11
Figura 2 Interferencia a nivel cross-tier.....	12
Figura 3 Interferencia a nivel co-tier.....	13
Figura 4 Descripción del algoritmo WWF.....	20
Figura 5 Metodología del trabajo propuesto.....	23
Figura 6 Diagrama de flujo del algoritmo GABGT.....	31
Figura 7 Capacidad de la red sin agrupamiento vs red con agrupamiento	40
Figura 8 Interferencia de la red sin agrupamiento vs red con agrupamiento	41
Figura 9 Satisfacción de la red sin agrupamiento vs red con agrupamiento	42
Figura 10 Simulación en MATLAB del escenario propuesto	47

Resumen

El incremento del tráfico inalámbrico requiere que se implementen propuestas para mejorar la cobertura, capacidad y conectividad de las redes celulares terrestres existentes y posibles redes que pueden ser levantadas en escenarios de difícil acceso o escenarios de emergencia. Una de las soluciones que se han venido proponiendo en los últimos años es la integración de estaciones base aéreas como son los drones. A pesar del enorme potencial, los sistemas de comunicación inalámbrica basados en drones enfrentan algunos desafíos como la gestión y control de recursos. Por lo tanto, en este trabajo se propone el agrupamiento de drones basándose en la teoría de juegos con el fin de incrementar el rendimiento de una red celular en situaciones de emergencia.

Palabras claves: Dron, Red celular, Teoría de juegos.

Abstract

The increase in wireless traffic requires the implementation of proposals to improve the coverage, capacity and connectivity of the existing terrestrial cellular networks and possible networks that can be built in difficult-to-access scenarios or emergency scenarios. One of the solutions that have been proposed in recent years is the integration of air base stations such as drones. Despite the enormous potential, drone-based wireless communication systems face some challenges such as resource management and control. Therefore, in this work the grouping of drones based on game theory is proposed in order to increase the performance of a cellular network in emergency situations.

Keywords: Dron, Cellular network, Game theory.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Incrementar el rendimiento de una red celular mediante la integración de drones que soporten el tráfico y el agrupamiento de los mismos.

Objetivos Específicos

- Revisar la literatura relacionada con el agrupamiento de drones que soporte el tráfico de sobrecarga del sistema celular terrestre basados en juegos de coalición.
- Diseñar y programar un algoritmo que encuentre la configuración de grupos de drones que maximice el rendimiento de la red celular.
- Realizar la asignación de frecuencias dentro de cada grupo de drones.
- Evaluar el rendimiento de la red celular.

Introducción

Debido al auge y aumento del uso del internet móvil, las redes celulares pueden experimentar una sobrecarga dentro de las estaciones base y difícilmente pueden solventar el tráfico que se demande. Especialmente por parte de las aplicaciones móviles que demandan requisitos de conectividad y disponibilidad con un crecimiento exponencial. Si se considera levantar una red en un área de difícil acceso o en un escenario de emergencia esto supondría un gran desafío respecto a la asignación de recursos (Cheng et al., 2018). Es por ello que como una alternativa se presenta el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV), conocidos comúnmente como drones, como una estación base aérea que garantice a los usuarios que se conecten a dicha estación una buena calidad de servicio y estabilidad. Los principales desafíos que enfrentan los drones son la gestión y control de los recursos, es por ello que se propone el agrupamiento de los drones mediante un juego de coalición y de esta manera aumentar el rendimiento de la red celular en lugares de difícil acceso y escenarios de emergencia.

El primer objetivo de este trabajo abarca la revisión de literatura relacionada con el agrupamiento de drones que soporte el tráfico de sobrecarga del sistema celular terrestre basado en un juego de coalición, este objetivo es de vital importancia ya que supondrá la base de este trabajo y permitirá conocer cuáles son los requerimientos necesarios para implementar un juego coalicional entre UAV's. También en base a la literatura revisada se puede determinar cuáles son los equipos (UAV's) que presenten un mejor desempeño para el fin que van a ser utilizados, y algo muy importante es que la literatura nos ayuda a plantear de mejor manera el escenario dentro del cual se va a centrar el desarrollo de este trabajo.

En cuanto al diseño y programación del algoritmo que encuentre la configuración de grupos de drones que maximice el rendimiento de la red celular será desarrollado en el entorno de programación MATLAB. Dicho algoritmo se centra en dos partes, la ubicación correcta de los UAV's en una posición estratégica en donde funcionarán como estaciones

base aéreas, esto será determinado por el algoritmo *K-means*, y el agrupamiento de los drones se dará mediante un juego de coalición. La asignación de recursos considerará parámetros como demanda, ancho de banda requerido y ancho de banda disponible para la formación de clústeres, los usuarios que se unan a una coalición tendrán mayores beneficios en cuanto a recursos que estando fuera de un clúster, la asignación de recursos se dará mediante el algoritmo *Weighted Water Fill WWF*. Será necesario la implementación de un registro histórico de coaliciones con la finalidad que no existan coaliciones repetidas a fin de optimizar recursos dentro de la red.

Una vez desarrollado el algoritmo se debe realizar la correcta asignación de frecuencias para cada grupo resultante de las coaliciones teniendo en cuenta una adecuada asignación de recursos. El algoritmo nos permitirá evaluar los resultados obtenidos mediante el agrupamiento de UAV's en una red celular y utilizarlos como estaciones base aéreas y compararlos con el estado de la red celular antes que se implementara este algoritmo. Las conclusiones nos llevarán a determinar cuáles han sido los aspectos que se han mejorado, cuales han sido las ventajas obtenidas, las deficiencias y las mejoras que se pudieren realizar.

Al contar con redes celulares conectadas a estaciones base terrestres ya saturadas este trabajo propone una solución mediante la utilización de UAV's como estaciones base aéreas, cuyo objetivo busque aliviar el tráfico de datos dentro de estas redes. Así como poder desplegar una nueva red o parte de ella en lugares de difícil acceso o en escenarios de emergencia haciendo uso de un algoritmo de agrupación donde los UAV's representan a jugadores dentro de un juego coalicional, cuyo resultado determinará el clúster ideal para cada usuario según sus necesidades y demandas dentro de la red celular. Cada UAV dará servicio a un número específico de usuarios, contará con canales disponibles, asignación de frecuencias y un área de cobertura en la cual se desenvolverá.

Capítulo uno

Estado del arte

El presente capítulo recopila información acerca de redes heterogéneas que servirán como escenario, UAV's (vehículos aéreos no tripulados), tipos de interferencia, capacidad, teoría de juegos y trabajos relacionados al tema propuesto.

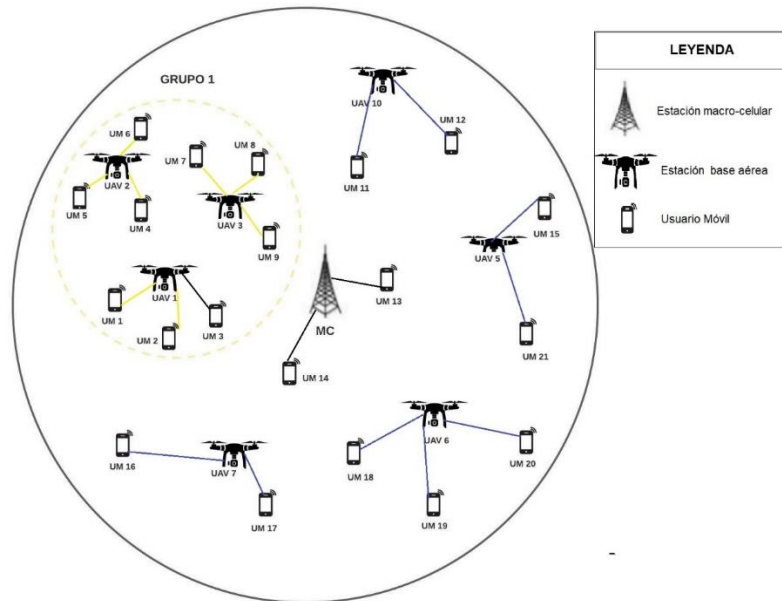
1.1 Red celular heterogénea

Para el presente trabajo se ha planteado como escenario una red celular heterogénea que puede ser desplegada en situaciones de emergencia. Las redes heterogéneas conocidas como HetNet, utilizan un conjunto de diversas soluciones en lo que concierne a estaciones base, estas se pueden implementar en distintas aéreas geográficas con el objetivo de mejorar la eficiencia espectral. Las estaciones base de baja potencia se pueden implementar para cubrir la falta de cobertura derivada de la implementación de sistemas desplegados únicamente con macro celdas y también para mejorar la capacidad de la red en puntos de gran concentración de tráfico y gran número de usuarios (Parra et al., s. f.).

En nuestro caso las estaciones base de baja potencia que vamos a utilizar son UAV, cuya ubicación se dará de una manera estratégica buscando siempre el mayor rendimiento de la red celular. En la Figura 1 se muestra el escenario de la red celular heterogénea planteado para este trabajo.

Figura 1

Red celular heterogénea del escenario propuesto.



1.2 Interferencia

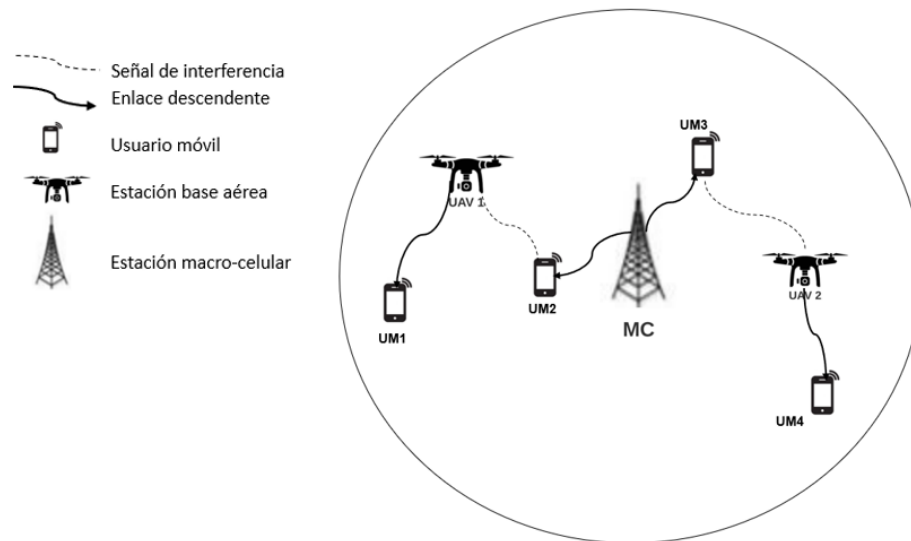
El despliegue de estaciones base de baja potencia como lo son los UAV dentro de una red celular heterogénea introduce ciertas variaciones en cuanto a la topología de las redes macro celulares convencionales. La nueva arquitectura de red se divide en dos niveles: el nivel de la macro celda y el nivel de las estaciones base UAV. Si varios UAV's emiten su señal en la misma banda de frecuencia y en el mismo escenario, el receptor que al igual comparte la misma banda de frecuencia y esta en el mismo escenario, no podrá identificar cual UAV transmisor es el que esta escuchando. Esta descripción elemental en telecomunicaciones simboliza uno de los principales desafíos en el despliegue de UAV's como estaciones base aéreas. Al tratar una red de dos niveles, se debe abordar dos tipos de interferencias: la interferencia de niveles cruzados (cross-tier) y la interferencia entre niveles (co-tier) (Magín et al., 2013).

1.2.1 Interferencia cross-tier

La interferencia a nivel cross-tier se refiere a situaciones en que la víctima y el agresor pertenecen a diferentes capas o niveles, se puede tomar como ejemplo, una estación base aérea UAV es el agresor y un usuario de la macro celda es la víctima (Chamorro Hernández, 2017). Este tipo de interferencia es lo que se observa en la figura 2.

Figura 2

Interferencia a nivel cross-tier.



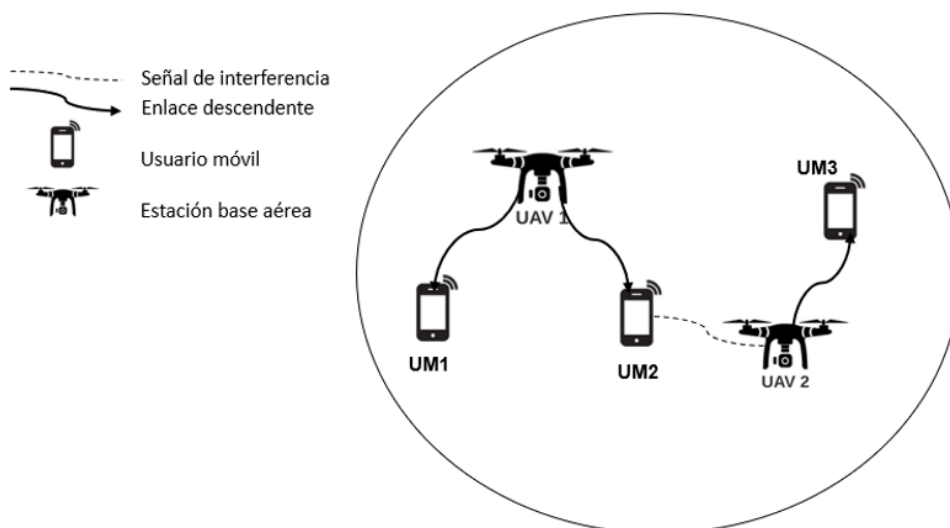
Nota: Interferencia cross-tier en enlace descendente.

1.2.2 Interferencia co-tier

La interferencia a nivel co-tier se da cuando el agresor y la víctima forman parte de la misma capa o nivel de red, se puede tomar como ejemplo, una estación base aérea UAV es el agresor y el usuario de una estación base aérea UAV diferente es la víctima (Chamorro Hernández, 2017). Esto es lo que se observa en la figura 3.

Figura 3

Interferencia a nivel co-tier.



Nota: Interferencia co-tier en enlace descendente.

1.3 Capacidad de la red

La capacidad de una red se puede definir desde diferentes perspectivas, una de ellas se refiere a la cantidad de datos efectivos que pueden ser transmitidos sin errores utilizando como medio un canal de comunicación, sin tener en cuenta cabeceras ni bits de control implícitos en las tramas, esta capacidad también se denomina rendimiento (Vélez Díaz et al., 2012). Esta es la razón por la cual al determinar la tasa de rendimiento lo que se obtiene realmente es lo que está recibiendo el usuario final en bits por segundo (bps). La capacidad de la red heterogénea puede disminuir debido a la presencia de interferencias en los enlaces provocada por la cercanía de las frecuencias portadoras asignadas a los usuarios (Muñoz & Narváez, s. f.).

1.4 UAV como estación base aérea

Las redes inalámbricas móviles presentan algunos inconvenientes como: fallas en la comunicación debida a una mala condición del canal sobre el cual son transmitidas e interferencia en algunos lugares del aérea en la que estas redes son desplegadas. Existen dos opciones principales para evitar fallas en la comunicación: navegación de canales (Shu et al., 2013). y retirada espacial (Network Management Software | Network Management Tools - ManageEngine OpManager, s. f.).

Debido a que la navegación por canales es una solución parcial, si se toma las condiciones de canal deterioradas, si consideramos el retiro espacial, este aprovecha la movilidad de los UAV's como una solución más integral para resolver fallas de comunicación en ciertas áreas de difícil acceso o escenarios de emergencia brindándole de esta manera a la red móvil mucha más flexibilidad y disponibilidad a los usuarios móviles. Basado en el mecanismo de vuelo de los UAV's, son ampliamente clasificados en dos categorías, drones de alas fijas y drones de alas giratorias (Sekander et al., 2020).

1.4.1 UAV's de ala fija

Los UAV's de ala fija pueden llevar carga útil pesada y pueden viajar a velocidades altas. Sin embargo, este tipo de UAV's tienen la necesidad de mantenerse en constante movimiento hacia adelante para poder mantenerse en el aire. Por lo tanto, no son adecuados para aplicaciones estacionarias como lo es servir de estación base aérea dentro una red celular (Sun et al., 2016).

1.4.2 UAV's de ala giratoria

Los UAV's de alas giratorias, aunque tienen una capacidad de carga útil y movilidad limitada, pueden moverse libremente en cualquier dirección o permanecer estáticos en el aire. Por lo tanto, estos drones se pueden utilizar como flotantes, y se los puede utilizar en un lugar determinado para garantizar una cobertura continua dentro de una red. Estos UAV's, sin embargo, consumen una cantidad significativa de energía para poder mantenerse flotando en el aire todo el tiempo (Sun et al., 2016). En el presente trabajo, se consideran los drones flotantes de alas giratorias, cada uno colocado en una ubicación fija para proporcionar la máxima cobertura a un grupo asignado de usuarios y se asume que la potencia de cada UAV será fija y constante en el tiempo.

El UAV que se tomará como referencia en este trabajo, es un UAV de alas giratorias, específicamente el phantom 4 pro, este UAV es el más usado en situaciones de emergencia por organismos de apoyo y rescate como el cuerpo de bomberos. Entre sus principales características están el peso ligero, aproximadamente de 1388 g, un tiempo de vuelo aproximado de 30 minutos, suficiente para levantar una red en situaciones de emergencia, el rango de frecuencia en el cual opera este dron es de 2.4 GHz y 5.8 GHz (*Phantom 4 Pro - DJI*, s. f.). Se asumirá el número de canales disponibles con los cuales opera, que en este caso será un máximo de 8 canales.

1.4.3 Ventajas

Los UAV se han visto involucrados de manera novedosa y con éxito dentro de distintos campos durante los últimos años, las telecomunicaciones no son la excepción, las principales ventajas de usar UAV's como estaciones base aéreas son:

- Pueden proveer cobertura en lugares de difícil acceso o en escenarios de emergencia.
- Alivianan el tráfico total de la red que soporta la macro celda y aumenta la capacidad de la misma.
- Se puede brindar cobertura a un mayor número de usuarios, incrementando el alcance de la red.
- Ahorro de energía para los usuarios que se conecten a estas estaciones base aéreas UAV's.
- Movilidad de las estaciones base UAV's extendiendo el alcance de la red.

Con la finalidad de mejorar el rendimiento de la red, los UAV's pueden cooperar en la formación de grupos, teniendo así un mejor manejo de los recursos. El objetivo en sí es encontrar el grupo de UAV's que dispongan la mejor asignación de recursos para cada usuario dentro de cada grupo, de modo que se pueda garantizar la máxima tasa de transmisión en la red (Shu et al., 2013). La ventaja más importante de los UAV's dentro de una red es su movilidad desinhibida. Los vehículos convencionales solo pueden moverse en dos dimensiones al desplazarse en el suelo, mientras que los UAV's de una red aprovechan su movilidad tridimensional en el espacio aéreo, lo que permite a los UAV's maniobrar sobre obstáculos y en escenarios de difícil acceso. Por tanto, los UAV's pueden ser un sustituto prometedor de los vehículos de respuesta a emergencias (Sun et al., 2016).

1.5 Teoría de juegos

En 1944 Von Neumann y Morgenstern establecen las bases de lo que actualmente se conoce como Teoría de Juegos clásica, proporcionando una solución para juegos de

suma cero (aquellos en los que los jugadores se encuentran en conflicto absoluto) y estableciendo los fundamentos para el análisis de juegos con más de dos jugadores (Castillo, s. f.).

Hablando en términos generales e intuitivos, podríamos decir que la Teoría de Juegos (GT) estudia situaciones de conflicto y cooperación a las que denominamos juegos. En estos casos interactúan individuos racionales, analizando los comportamientos y resultados que son de esperar, bien mediante decisiones individuales (caso de los juegos no cooperativos), bien mediante acuerdos entre los participantes (caso de los juegos cooperativos) (Castillo, s. f.).

La teoría de juegos describe dos enfoques, los juegos cooperativos y no cooperativos. En el enfoque cooperativo se analizan las posibilidades de que algunos o todos los jugadores lleguen a un acuerdo sobre qué decisiones va a tomar cada uno, mientras que en el enfoque no cooperativo se analiza qué decisiones tomaría cada jugador en ausencia de acuerdo previo (sepope juegos.pdf, s. f.).

El presente trabajo se enfoca en los juegos cooperativos, donde las poblaciones de individuos corresponden a la población de UAV's. En particular, los UAV's observan el comportamiento de otros UAV's y toman decisiones basadas en su recompensa y la recompensa promedio de todos los demás UAV's. Por ende, los UAV's se verán motivados a elegir las estrategias con las que encuentren una mejor recompensa, y estas serán las estrategias que predominaran dentro de una coalición.

Dentro de la teoría de juegos tenemos las coaliciones hedónicas, en las que los usuarios evaluarán cuáles son sus preferencias y necesidades para de esta manera elegir una coalición de acuerdo a sus requerimientos. Por tanto, los jugadores pueden elegir una coalición que maximice tanto los requerimientos propios como los requerimientos de toda la coalición a la que pertenece dentro de la red (Zheng et al., 2018).

1.5.1 *Juego de coalición con utilidad transferible*

Un juego de coalición con utilidad transferible se define como el par (N, v) donde $N = \{UA\}$ es el conjunto de jugadores o drones desplegados que incluye el subconjunto de UAV's disponibles y la función v se define para cada coalición $c \subseteq N$, $v(c)$ como un número real que representa la utilidad que recibe la coalición c , este valor también es conocido como el valor de una coalición. Esta utilidad se puede distribuir de cualquier forma arbitraria entre los UAV's pertenecientes a la coalición. El juego de coalición propuesto está en forma de partición ya que $v(c)$ depende de cómo se organizan los UAV's fuera de c ya que los UAV's pertenecientes a una coalición experimentan la interferencia de los UAV's fuera de la coalición c . Teniendo en cuenta que desde nuestra perspectiva asumimos que cada UAV es capaz de recopilar la información necesaria sobre la demanda de velocidad de datos correspondiente de los usuarios móviles cercanos y los UAV's vecinos, cada UAV contará con un registro generado desde su perspectiva (Rohoden et al., 2018a).

1.5.2 *Relación de preferencia*

La relación de preferencia modela de alguna forma las preferencias de los jugadores participantes. Sea X el conjunto de elementos de resultados con elementos comunes x, y, z . La relación en X representa los méritos relativos de dos resultados cualesquiera para el jugador con respecto a algún criterio. Las restricciones y debilidades se denotan como: Denotamos $x \succ y$ siempre que x se prefiera estrictamente a y y $x \succeq y$ siempre que x se prefiera débilmente a y . La relación de indiferencia se denota por $x \sim y$ lo que significa que el jugador es indiferente entre x y y (Slantchev, s. f.). En el presente trabajo la relación de preferencia está relacionada directamente al valor de Shapley de cada jugador, es decir, cuanto más alto sea este valor para un jugador dentro de una coalición, dicho jugador estará por encima de un jugador que cuente con un menor valor de Shapley.

1.5.3 Valor de Shapley

En la asignación de recursos, una de las maneras de repartir la ganancia total de un juego cooperativo de forma equitativa y acorde a la demanda de cada jugador es considerar el valor de Shapley para cada jugador, dicho valor permitirá resolver este tipo de conflictos. Podría decirse que el valor de Shapley es a los juegos cooperativos, como lo es el equilibrio de Nash es a los juegos no cooperativos (Romero Palop, 2015).

Teniendo un juego de coalición (N, v) , una coalición c , un conjunto de jugadores N , un valor de coalición $v(c)$, el valor de Shapley del jugador i se describe en la ecuación 1:

$$\varphi_i = \sum_{c \subset N \setminus i} \frac{|c|!(|N|-|c|-1)!}{|N|!} [v(c \cup i) - v(c)] \quad \text{ecuación (1)}$$

1.5.4 Estabilidad

En un conjunto de jugadores que toman acciones respecto a unirse a una coalición, esta se considera estable si ningún conjunto de jugadores cambiaría su acción dada la oportunidad. Una coalición es estable si satisface dos condiciones, a saber, estabilidad interna y externa (Shi et al., 2015). En el caso de la estabilidad interna, ningún jugador de una coalición tiene un incentivo para dejar su coalición y actuar como único, ya que la recompensa que recibe cualquier jugador de la coalición es mayor que la que recibe actuando solo. En el caso de la estabilidad externa, en una partición determinada, ningún jugador puede mejorar su recompensa abandonando su coalición. (Xu et al., 2020).

1.5.5 Core

El núcleo de un juego es el conjunto de todas las asignaciones estables. Un vector $x \in R^N$ es una asignación central del juego cooperativo (N, v) si para cada coalición se cumple la ecuación 2:

$$\sum_{i \in c} x_i \geq v(c) \quad \text{ecuación (2)}$$

Si existe el núcleo de un conjunto de vectores de pago, significa que ningún subconjunto de jugadores c podría aumentar su pago al desviarse de su coalición actual.

Sin embargo, a medida que aumenta el número de jugadores, el cálculo del núcleo se vuelve intratable ya que su cálculo se convierte en un problema combinatorio (Shi et al., 2015). Además, considerando que existe la posibilidad de no encontrar una distribución de pagos que asegure la estabilidad de las coaliciones, utilizamos el concepto central (Rohoden et al., 2018b). Tomando en cuenta este concepto se relaja la noción de núcleo al exigir que ningún miembro de una coalición se beneficie de manera significativa, o sea el caso que dentro de una cantidad constante, al desviarse de su coalición actual. En consecuencia, una coalición es estable si se cumple la ecuación 3:

$$\sum_{i \in c} x_i \geq v(c) - \varepsilon \quad \text{ecuación (3)}$$

Un valor mínimo de ε garantiza que el núcleo ε no esté vacío. Se usa el núcleo mínimo de un juego para encontrar la cantidad mínima de ε , ya que esto minimiza el incentivo de un UAV para abandonar su coalición.

1.6 Asignación de recursos

La asignación de recursos puede definirse como la división o distribución de bienes y servicios disponibles, a su vez se divide en gestión de recursos estáticos, y gestión de recursos dinámicos (Ortiz, s. f.):

1.6.1 Técnicas de gestión de recursos

Gestión de recursos estáticos. Es una técnica para administrar el espectro de una básica y convencional.

Gestión de recursos dinámicos. En este caso la asignación del espectro se da adaptándolo a la de la red mientras se cumple la métrica de rendimiento de ésta. La gestión de recursos dinámicos se divide en dos clases diferentes:

- **Esquema centralizado.** En este caso se requiere coordinación entre los individuos de la red a través de un nodo central. este nodo es el responsable de la recolección de información para calcular de forma óptima la asignación del recursos.

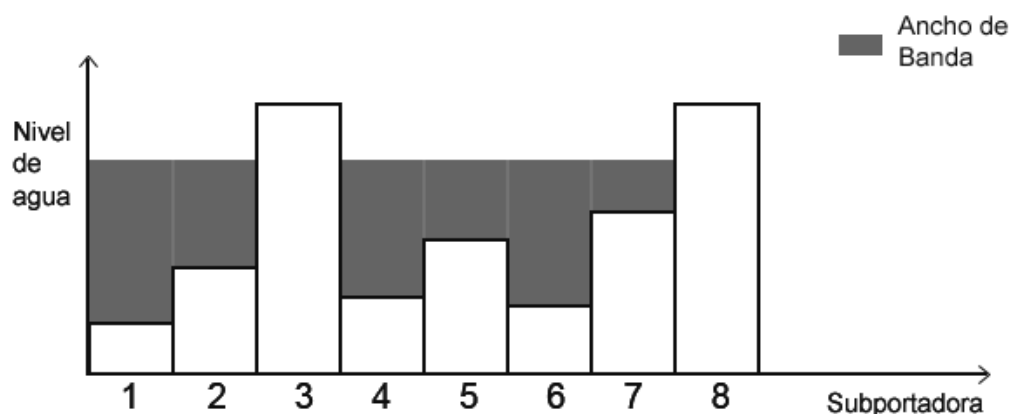
- **Esquema distribuido.** No es necesario contar con un nodo central para una óptima asignación de recursos. El nivel de coordinación requerido es insignificante en todas los individuos de la red.

1.6.2 Llenado de agua ponderada (WWF)

El Llenado de Agua Ponderada (WWF) es un algoritmo que asigna ancho de banda de acuerdo a la demanda de velocidad de datos de los usuarios (Zhao et al., 2012), (Estrada et al., 2016). Los recursos en WWF se pueden asignar de un grupo de usuarios a otro grupo de manera eficiente. En WWF se propone una configuración de peso relacionada con la velocidad. La configuración del peso permite ajustar el peso de los usuarios para obtener un mejor rendimiento. La clave para la función peso, es que el peso debe ser menor cuando la velocidad de transmisión es alta, y el peso debe elegirse de manera que el usuario reciba el mayor beneficio (*Radio Resource Management in Multi-Tier Cellular Wireless Networks* | Wiley, s. f.). La Figura 4 detalla cómo es el funcionamiento de WWF.

Figura 4

Descripción del algoritmo WWF



Nota: Fuente (Piedra Cevallos, 2020).

Si se utiliza WWF para la asignación de recursos, a través de la asignación de ancho de banda para cada usuario se mejora el rendimiento de la capacidad del sistema. La solución de WWF tiene una interpretación visual de verter agua sobre una superficie dada por el inverso de las ganancias del subcanal, es por ello su nombre. WWF define la forma

de distribuir ancho de banda entre los canales de frecuencia. La idea principal es aumentar la capacidad acumulando el ancho de banda en los canales menos interferidos. En la Figura 4 el ruido y la interferencia se interpretan como el fondo del recipiente, WWF llena de ancho de banda el recipiente como si fuera un líquido (Piedra Cevallos, 2020).

1.7 Trabajos relacionados

El agrupamiento de UAV's que funcionan como estación base aérea permite administrar los recursos radioeléctricos de una red de una manera más eficiente obteniendo un mayor rendimiento y disminuyendo la interferencia *co-tier* producida por los UAV's.

En (Rohoden et al., 2018a) se maneja una red macro-femtocelular, que es similar a lo que se propone en nuestro trabajo, afronta el problema de agrupamiento de femtoceldas en tres pasos, selección de estaciones base, juego de coalición y asignación de recursos de dos formas: centralizada y distribuida, logrando un mejor desempeño de la red en comparación con modelos de referencia. Un criterio importante si hablamos de formación de grupos basados en la Teoría de Juegos Evolutivo (EGT) es la estabilidad, en (Rohoden et al., 2020) se centra en dar solución a este problema mediante técnicas de Estrategias Evolutivas Estables (EES), principalmente toma la dinámica del replicador para lograr grupos estables y optimizar el rendimiento de la red. Además, para el algoritmo de asignación de recursos utiliza *Particle Swarm Optimization* (PSO) localmente dentro de cada clúster, menciona que PSO ha demostrado que brinda una solución satisfactoria casi óptima al tiempo que tiene la ventaja de acelerar el proceso de optimización.

Una forma bastante eficiente para la asignación de recursos es dividir la red en dos niveles como menciona (Rohoden et al., 2018a) y (Rohoden et al., 2020) , de esta manera se garantiza a los usuarios móviles calidad de servicio QoS mediante la disminución de la interferencia *co-tier*. (Feng et al., 2016) analiza una política de asignación de espectro descentralizada óptima para redes de dos niveles. El enfoque es óptimo en términos de

eficiencia espectral de área al tiempo que garantiza que los usuarios de macro celda MC y los usuarios de UAV estación base obtengan una velocidad de datos prescrita.

En el proceso de asignación de recursos, estos se reparten de forma equitativa o de acuerdo a la demanda por parte de los usuarios, es por ello que en (Rohoden et al., 2020) esta asignación de recursos la realiza a través del algoritmo de Optimización de Enjambre de Partículas (PSO) dentro de cada *clústeres* y menciona que la satisfacción de la red luego de aplicado este algoritmo es mayor dado que reduce la interferencia co-tier en redes de femtoceldas densas. Otro algoritmo de asignación de recursos bastante usado en redes de dos niveles debido a su alto rendimiento es WWF como lo menciona (Rohoden et al., 2018a).

Dentro de las estaciones base de baja potencia que pueden usarse en una red heterogénea se encuentran los UAV's. (Mittal et al., 2021) aborda el problema de compartir recursos en una red inalámbrica basada en UAV's y considera un ajuste de control distribuido bajo incertidumbre. El problema se proyecta como un juego cooperativo bayesiano en el que los agentes (UAV's) participan en un proceso de formación de coaliciones, donde el objetivo es maximizar la tasa de transmisión general de la red. Los UAV's actualizan sus creencias utilizando una técnica novedosa que combina la estimación de máxima verosimilitud con la divergencia Kullback-Leibler.

(Akkarajitsakul et al., 2013) considera un concepto de solución llamado estabilidad de Nash para encontrar una estructura de coalición estable dentro de un juego evolutivo y presenta un algoritmo distribuido y un modelo de cadena de Markov en tiempo discreto (DTMC) para encontrar las estructuras de coalición estable de Nash. También considera otro concepto de solución, el núcleo bayesiano, que garantiza que ningún nodo móvil tenga un incentivo para abandonar la coalición a la que pertenece. La participación cooperativa de los UAV's utilizados como base estación aéreas dentro de una red pueden mejorar el rendimiento de la entrega de datos al explotar la movilidad que ofrecen este tipo de estaciones base de baja potencia.

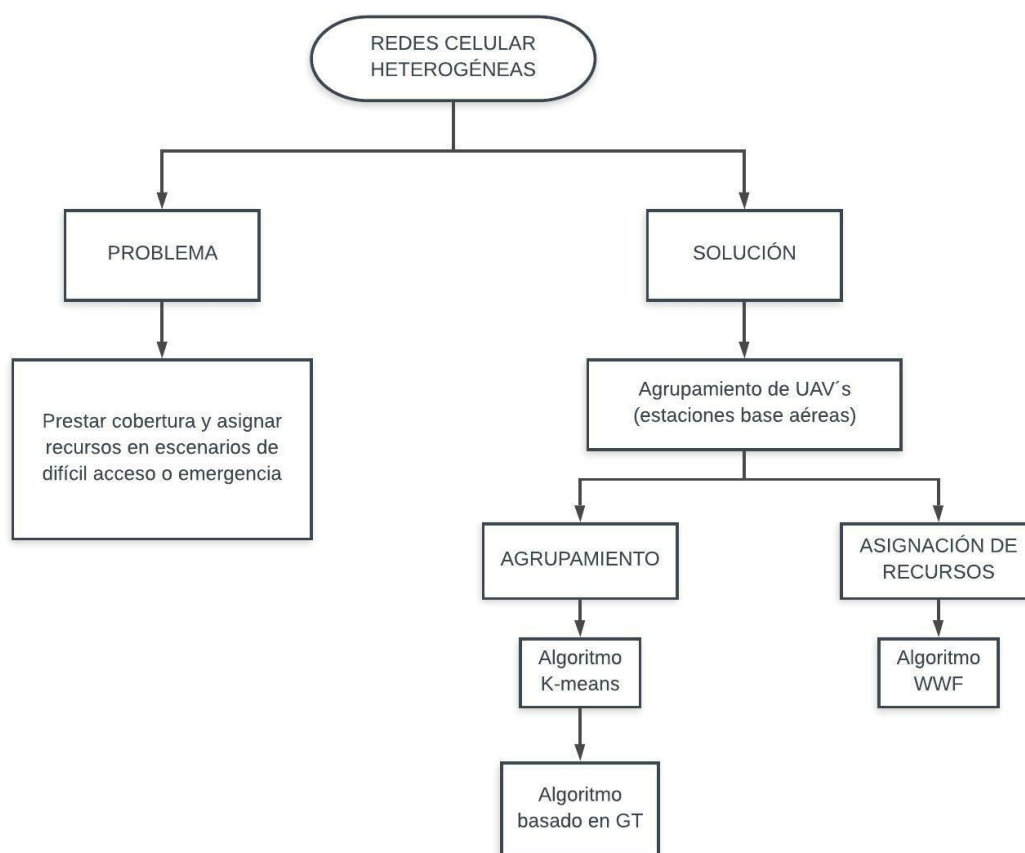
Capítulo dos

Metodología

El presente capítulo aborda la metodología del trabajo de titulación, en donde se soluciona el problema de la asignación de recursos en redes celulares heterogéneas desplegadas, ya sea en zonas de difícil acceso o escenarios de emergencias, a través de la agrupación de UAV's que funcionan como estaciones base aéreas. La solución planteada parte inicialmente de una agrupación o asignación de usuarios celulares a los UAV's que funcionan como estaciones base aéreas, esto con el algoritmo *K-means*. Para luego encontrar grupos estables de UAV's basándose en GT, la Figura 5 muestra la metodología empleada en el desarrollo de este trabajo.

Figura 5

Metodología del trabajo propuesto



2.1 Modelo del sistema

Se considera una red macro-UAV celular con un despliegue de varios UAV's bajo el área de cobertura de la macro celda MC. El conjunto de UAV's está dado por A , y se compone por: $A = \{ A_1; A_2; A_3; \dots; A_n \}$. El conjunto de subportadoras CS está conformado por $CS = \{ S_1; S_2; S_3; \dots; S_n \}$. Y a su vez el conjunto de subportadoras se divide para los dos niveles existentes en la red, un grupo se asigna a la macro celda (SC_{macro}), y el grupo restante a los UAV's (SC_{UAV}). AB_s representa el ancho de banda asignado a cada subportadora.

Para el mejor rendimiento de la red se utilizan UAV's en modo de acceso híbrido. En esta configuración los UAV's permite la conexión de usuarios no suscritos limitando la cantidad de recursos que son compartidos (*Control de interferencias en redes heterogéneas LTE-A con despliegues de femtoceldas - Repositorio Institucional de Documentos, s. f.*). La velocidad de datos es aleatoria para todos los usuarios y varía entre los 256 Kbps y 512 Kbps.

Una vez desplegadas las estaciones base aéreas UAV's dentro de la red y realizada la agrupación con GT, se puede dar el caso que uno o varios UAV's no estén formando grupos como se observa en la Figura 1, al tener este escenario los UAV's que se encuentren solos, al hacer uso del grupo de subportadoras para el nivel UAV causan interferencia entre ellos produciendo interferencia a nivel de los UAV's. Buscando evitar este tipo de interferencia es recomendable formar grupos de UAV's, la demanda de cada grupo es el factor a tomar en cuenta para la asignación de recursos dentro de cada grupo de UAV's. El UAV con el mayor número de UAV's vecinos es nombrado líder en su grupo, y es el encargado de comunicar a la macro celda los recursos que su grupo necesita.

2.2 Planteamiento del problema

La asignación de recursos en redes de dos niveles supone un desafío debido a que este proceso se ve afectado por la interferencia co-tier. Las soluciones centralizadas para la

gestión de la interferencia para este tipo de redes son descartadas debido a su complejidad computacional (Abdelnasser et al., 2014) en la distribución de recursos se propone dividir el problema de asignación de recursos en dos subproblemas: el subproblema de agrupación y el subproblema de asignación de recursos. El subproblema de agrupación se resuelve utilizando la teoría de juegos en donde los UAV's son los jugadores dentro del juego. En la ejecución del juego se busca formar grupos estables con una recompensa mayor o igual a la recompensa promedio de los UAV's restantes que no pertenezcan a un grupo. La formación de grupos tiene como objetivo mejorar el rendimiento de la red celular, asignar recursos dentro de cada grupo y reducir la interferencia de la red.

Por ende el aumento del rendimiento de la red está garantizado debido al aumento del rendimiento de cada grupo de UAV's, para formar y verificar los grupos se utiliza el valor de Shapley. El algoritmo 3.2 describe el subproblema de formación de grupos. La solución del subproblema de asignación de recursos es maximizar el rendimiento dentro del grupo utilizando la técnica de WWF descrita en el algoritmo 3.4. Todo grupo debe poseer un líder o una cabeza de grupo (CH), y es el UAV con el mayor número de vecinos. El líder del grupo es el encargado de la asignación de recursos para cada miembro del grupo al que pertenece.

En el escenario propuesto, los UAV's forman grupos a través de un algoritmo de agrupación basado en GT. En las transmisiones de enlace descendente (DL) con tecnología OFDMA, la capacidad del UAV está representada por (Yang, 2010) en la ecuación 4:

$$\varepsilon_a^s = \log_2(1 + SINR_u^{s,a}) \quad \text{ecuación (4)}$$

Donde:

ε_a^s es la eficiencia espectral del UAV a en la suportadora s .

$SINR_u^{s,a}$ representa la relación señal a interferencia más ruido.

u es el usuario móvil.

a es el UAV.

s es la subportadora.

El escenario propuesto en la Figura 1 muestra una red de dos niveles, el presente trabajo busca maximizar el rendimiento en el nivel UAV-celular, por lo tanto, se hace uso de una función de utilidad, se caracteriza por ser la suma de la velocidad de datos requeridos de los usuarios atendidos por los UAV's que pertenezcan a un grupo y se define en la ecuación 5:

$$Cap_{max} = \sum_{a \in \{A_g\}} \sum_{u \in \{UM\}} \sum_{s \in \{CS\}} \alpha_u^a \beta_u^{s,a} AB_s \log_2(1 + SINR_u^{s,a}) \quad \text{ecuación (5)}$$

Donde:

A_g es el conjunto de UAV's que pertenecen a un grupo g .

UM es el conjunto de usuarios móviles.

CS es el conjunto de subportadoras.

α_u^a indica si el usuario u es servido por el UAV a .

$\beta_u^{s,a}$ indica que la subportadora s está asignada al usuario u en el UAV a .

AB_s es el ancho de banda por subportadora.

2.3 Propuesta del juego coalicional

La sección 1.6 hace mención a la Teoría del Juego, donde se simula poblaciones de jugadores que utilizan diferentes estrategias utilizando un proceso similar a la selección natural para determinar la evolución de la población. En el modelo planteado, el despliegue de UAV's constituye la población de individuos, en donde los UAV's observan el comportamiento de otros UAV's y toman decisiones en base a su recompensa. En consecuencia, las estrategias que den mejores resultados serán escogidas por los UAV's, de esta forma la estrategia que asegure la estabilidad del juego prevalecerá en el tiempo. Tomando los conceptos referentes a GT en (Szabó & Fáth, 2007), y aplicando al modelo planteado, se define en la ecuación 6:

$$J = \{U, e, \gamma_a\} \quad \text{ecuación (6)}$$

Donde:

U corresponde al conjunto de UAV's (jugadores).

e es el conjunto de todas las estrategias disponibles para cada jugador.

γ_a es la recompensa del UAV.

2.4 Estrategia del juego propuesto

El algoritmo propuesto pretende aprovechar la movilidad que presentan los UAV's de alas giratorias como estaciones base aéreas capaces de brindar cobertura dentro de una red móvil con el objetivo de mejorar su rendimiento, la ubicación de los UAV's se determina de manera aleatoria .

En los juegos cooperativos se parte de la posibilidad que algunos jugadores puedan llegar a acuerdos vinculantes, por lo que se trata de estudiar los resultados que puede obtener cada una de las coaliciones de jugadores que se pueda formar. Por tanto, se trata de estudiar el comportamiento de estos grupos de jugadores, los que nos interesan son los comportamientos colectivos mas no los individuales (Castillo, s. f.). Una vez propuesto el juego el grupo de estrategias estas se definen en la ecuación 7:

$$e = \{u_0, u_1\} \quad \text{ecuación (7)}$$

Donde:

u_0 indica que pertenece a un grupo de UAV's.

u_1 indica que no pertenece un grupo de UAV's.

2.4.1 Recompensa

La recompensa se describe dentro de una función matemática que detalla el pago otorgado a un jugador como resultado de haber participado en un juego. En cualquier juego, la recompensa es un número que representa las motivaciones de los jugadores (Castillo, s. f.). La recompensa de un UAV se define en la la ecuación 8:

$$\gamma_a = \left\{ \begin{array}{l} e = \{u_0\} \quad ; \quad \sum_{u \in \{UM\}} \sum_{s \in \{CS\}} \alpha_u^{Ag} V_u^{s,a} + CS_{ext} \\ e = \{u_1\} \quad ; \quad \sum_{u \in \{UM\}} \sum_{s \in \{CS\}} \alpha_u^{Ag} V_u^{s,a} \end{array} \right\} \quad \text{ecuación (8)}$$

Donde:

α_u^a usuario u servido por el UAV a .

$V_u^{s,a}$ velocidad de datos asignados al usuario móvil servido por el UAV, con subportadora s .

CS_{ext} subportadoras extras.

Las subportadoras extras que se asignan a los UAV's estación base aéreas que participen en dentro de una coalición se definen en la ecuación 9:

$$CS_{ext} = \left(\frac{pe(u_a)}{V_{co}/\sum pe(u_a)} \right) \quad \text{ecuación (9)}$$

Donde:

CS_{ext} subportadoras extras.

pe es el peso del UAV.

V_{co} es el valor de utilidad transferible de la coalición.

u_a usuarios suscritos al UAV a .

2.4.2 Valor de Shapley

Una de las maneras de repartir la ganancia total de un juego cooperativo de forma equitativa y acorde a la demanda de cada jugador es considerar el valor de Shapley para cada jugador, dicho valor permitirá resolver este tipo de conflictos (*Romero_Palop_JuanDeDios_tfg.pdf*, s. f.).

Shapley en 1953 luego de analizar durante mucho tiempo los juegos cooperativos propuso el concepto de valor de un juego (N, v) dado para cada jugado $i \in N$. La ecuación 1 describe matemáticamente el valor de Shapley, este valor es determinado de forma exclusiva y apriori, por la función característica del juego. El valor de Shapley busca establecer una serie de pagos entre los jugadores de manera tal que se cumplan determinados criterios denominados axiomas como: eficiencia, simetría, jugador pasivo y aditividad. Dando origen a una única asignación de recursos entre los jugadores (*El valor de shapley como estrategia de optimización de recursos sobre Power Line Communication*

(PLC), s. f.). El valor de Shapley puede interpretarse como la contribución marginal esperada del jugador i o como un promedio de las contribuciones marginales $[v(H) - v(H - i)]$ de dicho jugador a todas las coaliciones no vacías $H \in 2^N$, considerando que la coalición del jugador sea equiprobable en tamaño $1 \leq h \leq n$ y que todas las coaliciones de tamaño S tienen la misma probabilidad (*Small Cell Networks and the Evolution of 5G - Qorvo*, s. f.).

El valor de Shapley premia ponderadamente todas las contribuciones marginales del jugador a todas las coaliciones a las que pertenece y, por tanto, a diferencia de si se usa una regla proporcional, tiene en cuenta todas las coaliciones y no solamente las de tamaño extremo (es decir, las individuales y la total) (*Volumen+1%2FCapítulo+1.pdf*, s. f.). Esto significa que, en un juego entre varios jugadores, el valor de Shapley reparte las utilidades de una forma bastante sencilla: garantiza a los jugadores sus utilidades individuales y, una vez descontadas éstas, reparte a partes iguales el sobrante hasta completar la utilidad de la coalición total.

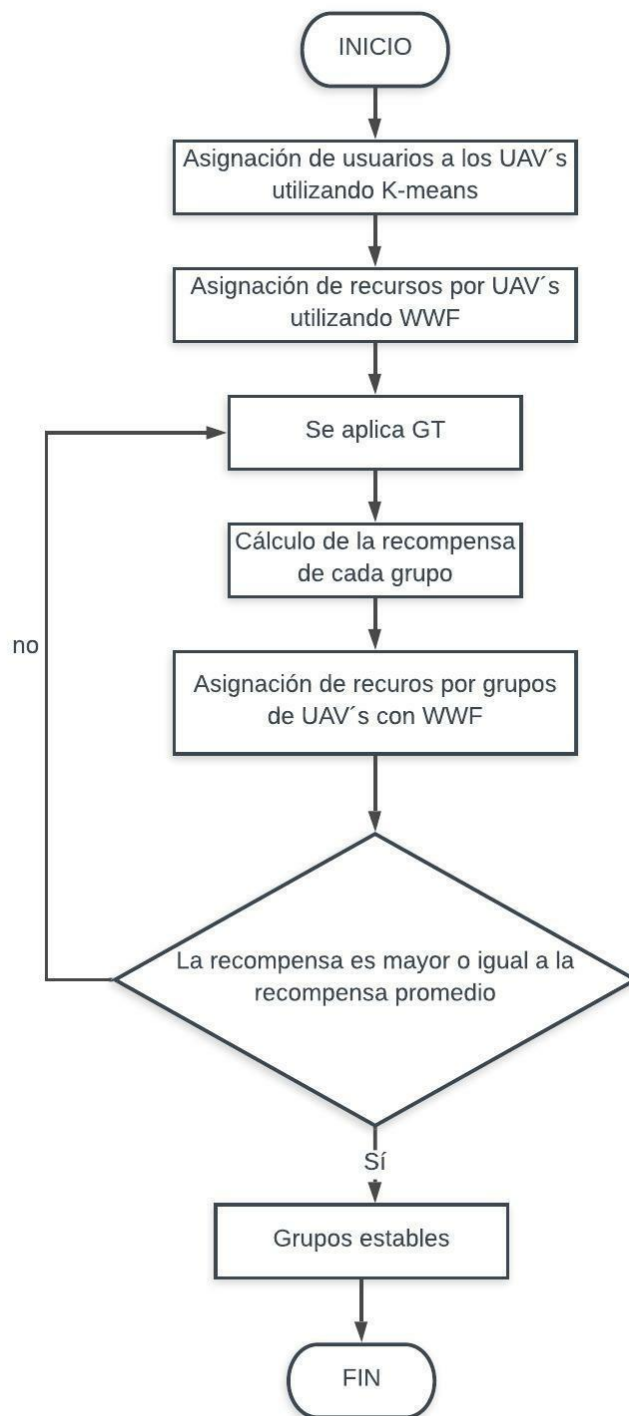
Capítulo tres

Algoritmo de agrupación basado en la teoría del juego

En este capítulo se presenta la estructura del algoritmo para aportar la solución al problema planteado el cual se lo ha denominado “*grouping algorithm based on game theory*” (**GABGT**). Antes de ejecutar el algoritmo **GABGT** se realiza una formación inicial de grupos de UAV's utilizando el algoritmo *K-means*. Luego se aplica la teoría de juegos para formar grupos estables, si algún jugador queda fuera de un grupo, estos se agrupan utilizando el algoritmo *K-means*, todo esto para lograr un mejor rendimiento en la red. Para la asignación de recursos se emplea WWF en cada grupo. La Figura 6 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo **GABGT**.

Figura 6

Diagrama de flujo del algoritmo GABGT



3.1 Algoritmo K-means para asignación de usuarios a UAV's

K-means es un algoritmo iterativo que divide un conjunto de datos en k grupos, en donde cada uno de los elementos de datos pertenece a un solo grupo. Asigna puntos de datos a un grupo de modo que la suma de la distancia al cuadrado entre los puntos de datos sea mínima (*K Means | PDF | Cluster Analysis | Image Segmentation*, s. f.). Inicialmente K -

means toma n UAV's de forma arbitraria que representan puntos de ubicación. Estos puntos de ubicación también denominados centroides (Nair, 2019), los define como puntos de datos en el centro de un grupo, de modo que cada centroide es único. En este caso trabajo el algoritmo 3.1 define el funcionamiento de cómo se realiza la asignación de usuarios móviles hacia las bases estaciones aéreas UAV's.

Algoritmo 3.1: Algoritmo de asignación k-means

Entrada: Conjunto de usuarios (c), Número de grupos ($k = \text{número de UAV's}$)

Salida: Conjunto de UAV's

1. Inicio
 2. Elegir n según el número de UAV's como centroides para agrupación inicial.
 3. **for** $u = 1: k$ **do**
 4. Asignar cada usuario (c) con el centroide más cercano (UAV).
 5. Calcular los centroides de los grupos de la partición actual.
 6. Finalizar si no hay nuevas asignaciones para cada UAV, caso contrario regresar a paso 3.
 7. **Fin**
-

3.2 Algoritmo de formación de grupos GABGT

Al momento de contar con una red celular saturada o con usuarios a los cuales no se les pueda prestar servicio de manera eficiente en zonas de difícil acceso o sea el caso que se necesite levantar una red en un escenario de emergencia, utilizar técnicas de agrupamiento es facilitan que se brinde el servicio y garantizan una mejor asignación de los recursos de la red, en esta sección se describe el proceso para la formación de grupos de UAV's que sean estables, aplicando el Algoritmo 3.2. Al implementar grupos dentro de una red celular de dos niveles como la nuestra, se reduce la complejidad al asignar recursos, y también se reduce la interferencia a nivel co-tier, es decir la interferencia producida por los UAV's. El algoritmo que se propone, aplica GT calculando todas las posibles combinaciones entre los UAV's participantes en el juego para luego calcular el peso de cada coalición

basándose en el valor de Shapley para cada jugador y se procede a la formación de grupos estables.

Teniendo las asignaciones iniciales entre usuarios y los UAV's estaciones bases aéreas, se procede a asignar la posición central proporcionada por *K-means* para cada UAV estación base aéreas dentro del área de cobertura de la red, esa será la posición de los jugadores para realizar el agrupamiento de UAV's aplicando GT.

El algoritmo de agrupamiento GABGT inicia calculando todas las posibles combinaciones entre los jugadores UAV's, a continuación, se seleccionan las combinaciones posibles de acuerdo al criterio del valor de Shapley según el peso de cada jugador. Se calcula la demanda de las posibles coaliciones para saber cuál es el valor de utilidad transferible de cada coalición para posteriormente verificar la estabilidad de estas coaliciones. Como lo que pretende este algoritmo es maximizar el rendimiento de la red, las coaliciones que sean estables entran a un *payoff* donde se filtrarán las coaliciones que muestren un mejor comportamiento en cuanto a la relación de número de subportadoras adicionales asignadas vs el tamaño de la coalición. Dichas coaliciones de UAV's serán las finales y con ellas se afrontará el proceso de asignación de recursos.

Algoritmo 3.2: Algoritmo de formación de grupos **GABGT**

Entrada: Conjunto de UAV's (A), Conjunto de subportadoras SC , Número de UAV's (N_A)

Conjunto de usuarios asignados a los grupos de UAV's U_a

Ubicación de los UAV's A_{ubi}

BS=0.015 ancho de banda de subportadora, **ft=6**

Salida: Conjunto de grupos estables de UAV's

1. Inicio
 2. Calcular matriz de distancias M
 3. Cálculo de distancias entre UAV's
 4. **For i= 1: N_A do**
 5. Calcular todas las combinaciones $CB(A_{ubi}, i)$
 6. **Fin**
 7. **For i=1:CB**
 8. Calcular posibles coaliciones $PCb(M, i)$
-

```

9.          Filtar  $P_{coa}$  posibles coaliciones  $PCb$  de  $CB$ ,
10.        Fin
11.        For i=1:  $P_{coa}$ 
12.            Sumar demanda de los usuarios en coalición  $D_u$ 
13.            Calcular el valor de la coalición  $V_{co} = \text{floor}(D_u / (BS * se - ft))$ 
14.        Fin
15.        For i= 1:  $N_A$  do
16.            Matriz de Shapley  $M_{Shap}$ 
17.            For j=1:  $M_{Shap}$ 
18.                Calcular vector de coeficientes de Shapley
                    
$$B = !(j - 1) * ((! M_{Shap} - j) / (! M_{Shap}))$$

19.            Fin
20.            Calcular el peso de cada jugador
                    
$$z = \text{floor}(M_{Shap}(i, :).B), \text{Peso}(i) = \text{sum}(z)$$

21.        Fin
22.        For i=1:  $P_{coa}$ 
23.             $e_{core} = 0.015 * V_{co}$ 
24.            Calcular subportadoras extras
                    
$$CS_{ext}(i) = \text{floor}(\text{Peso}(\text{members}) * (V_{co} / \text{sum}(\text{Peso}(\text{members})))$$

25.            If  $Est = CS_{ext} \geq (V_{co} - e_{core})$  calcular estabilidad
26.                Coalición Shapley  $Co_{Sha} = P_{coa}$  Es estable
27.            Else
28.                 $P_{coa}$  desechada

29.        Fin
30.        While  $Co_{Sha} = estable$ 
31.            For i=1:  $Co_{Sha}$ 
32.                Se calcula la recompensa
                    
$$\text{recompensa} = \frac{\text{número } CS_{ext}}{\text{tamaño } P_{coa}}$$

33.            Fin
34.             $Co_{final}$  se escoge la coalición con mayor valor de
recompensa
35.            Se eliminan las coaliciones en las que participen miembros de
 $Co_{final}$ 
36.        Fin
37.        Conjunto de grupos estables de UAV's  $Co_{final}$ 
38.        Asignación de recursos a los UAV's independientes

```

```

39.      Asignación de recursos por coalición de UAV's  $C_{o_{final}}$ 
40.      If UAV  $\notin G$ 
41.          Algoritmo 3.3
42.      Fin
43.Resultados:
    • Interferencia
    • Capacidad
    • Satisfacción de la red
44. Fin

```

Dado el caso que un UAV no pertenezca a uno de los grupos luego de aplicar GT, se utiliza el algoritmo *K-means* para agrupamiento de UAV's en una segunda fase de agrupación. La asignación de recursos para cada grupo de UAV's luego de aplicar todos los procesos de agrupación se realiza a través de WWF.

3.3 Algoritmo k-means para formación de grupos de UAV's

Este algoritmo es una variación del algoritmo 3.1. Este se lo utiliza para agrupar UAV's que luego de haber aplicado el algoritmo 3.2 hayan quedado fuera de grupo, esto buscando el mayor rendimiento de la red. Una vez elegidos los centroides, cada UAV se asigna al grupo con el centroide más cercano a su ubicación. La ubicación de los centroides se actualiza en base a la asignación de los UAV's en los grupos. El número de grupos utilizados para el despliegue denso de UAV's en el modelo del sistema es k , y k variará según sea el caso que aumente o disminuya el número de UAV's, el Algoritmo 3.3 indica su funcionamiento.

Algoritmo 3.3: Algoritmo *k-means* para formación de grupos de UAV's

Entrada: Conjunto de UAV's sin agrupar (A_{Exc}), Número de grupos (k)

Salida : Conjunto de grupos UAV's

1. Inicio
 2. Elegir arbitrariamente n UAV's de A_{Exc} como centroides para agrupación.
 3. **for** $u = 1: k$ **do**
-

-
4. Asignar cada UAV al grupo con el centroide más cercano.
 5. Calcular los centroides de los grupos de la partición actual.
 6. Finalizar si no hay nuevas asignaciones para cada grupo, caso contrario regresar a paso 4.
 7. **Fin**
-

3.4 Algoritmo para asignación de recursos WWF

El algoritmo con el que se trabaja para la asignación de recursos dentro de la red celular es WWF, este es un algoritmo que asigna ancho de banda y potencia, acorde a la demanda de velocidad de datos por parte de los usuarios móviles. El peso (w_u) utilizado en este algoritmo viene dado por la ecuación 9:

$$w_u = \frac{D_u}{\sum_{a \in \{G\}} \sum_{u \in \{UM\}} \alpha_u^a D_u} \quad \text{ecuación (9)}$$

Para el cálculo del ancho de banda a asignar, se necesita conocer el ancho de banda requerido por el usuario $u(ab_u^{requerido})$ y el ancho de banda del UAV (ab_u^a) (Piedra Cevallos, 2020). El Algoritmo 3.4 indica el proceso de asignación de recursos utilizando WWF.

Algoritmo 3.4: Algoritmo de asignación de recursos WWF

Entrada: Ancho de banda asignado al nivel de UAV AB_a

Conjunto de usuarios asignados a los grupos de UAV's U_a

Salida : Velocidad de datos y asignación de recursos por usuario

1. Inicio
 2. Ordenar a los usuarios en forma ascendente de acuerdo con el ancho de banda requerido.
 3. **for** $u = 1: U_a$ **do**
 4. Obtener el ancho de banda ab_u a asignar: $\rightarrow ab_u = \min\left(\frac{ab_u^{requerido}}{w_u^a}\right)$
 5. Asignación de ancho de banda.
 6. **Fin**
-

Capítulo cuatro

Resultados y discusión

En este apartado se presenta y analiza los resultados de la simulación del algoritmo propuesto realizados en MATLAB. Los resultados se enfocan en el rendimiento, interferencia y satisfacción de la red. Dentro del escenario propuesto los UAV's estación base aéreas aumentan de 5 a 20 y se despliegan en un área de 500 m x 500 m. Para cada UAV se asigna un suscriptor con una demanda variable. La Tabla 1 muestra los parámetros iniciales de configuración de la red.

Tabla 1

Configuración de parámetros iniciales

Configuración de la Red		
Símbolo	Descripción	Valor
n_s	Número de subportadoras	256
$AB_{clusters}$	Ancho de banda para <i>clústeres</i>	1.1520 MB
AB_s	Ancho de banda por subportadora	15 KHz
P_t^{MC}	Potencia transmitida por MC	60 dBm
P_t^{AC}	Potencia transmitida por AC	10 dBm
δ_{MC}	Radio macro celda	500 m
δ_A	Radio UAV	20 m
f_c	Frecuencia de la portadora	2.3 GHz
N_0	Ruido	3.140e-14
L_0	Pérdidas de camino	3 dBm

El modelo descrito en el capítulo 3 presenta la solución al problema planteado. El número de usuarios públicos atendidos por un UAV es variable de acuerdo a su ubicación en el escenario de despliegue de la red. La Tabla 2 indica el máximo número de usuarios que cada despliegue de UAV's puede atender.

Tabla 2

Despliegue de UAV's y usuarios móviles

Número de UAV	5	10	15	20
Máximo UM desplegados	20	40	60	75
Total de usuarios a servir	20	40	60	75

Al momento de utilizar UAV's como estaciones base aéreas se aprovecha la movilidad de los UAV's para prestar cobertura en lugares de difícil acceso mejorando el alcance de la red o ya sea el caso que se necesite levantar una red en escenarios de emergencia. El objetivo de desplegar UAV's como estaciones base aéreas es aliviar el tráfico total que soporta la red y por ende se mejora su rendimiento. Además, los usuarios que se conecten a las estaciones base aérea tendrán un ahorro significativo en cuanto al consumo de energía en sus dispositivos.

Al agrupar los UAV's que funcionan como base estaciones aéreas se consigue disminuir la interferencia a nivel co-tier y se mejora la capacidad de la red con la reutilización de subportadoras dentro de los grupos de UAV's que se formen, esta es una manera de afrontar la asignación de recursos en redes de dos niveles como es la planteada en este trabajo.

Para la asignación de recursos se utiliza el algoritmo WWF, con la particularidad que para los grupos que se forman con el algoritmo GABGT utilizan el 30 % del ancho de banda del total de la red disponible para la formación de clústeres, y para los grupos que se forman en una segunda agrupación con el algoritmo *K-means* se utiliza el 20 % del total de ancho de banda disponible de la red.

4.1 Escenario sin agrupamiento de UAV's vs escenario agrupamiento de UAV's

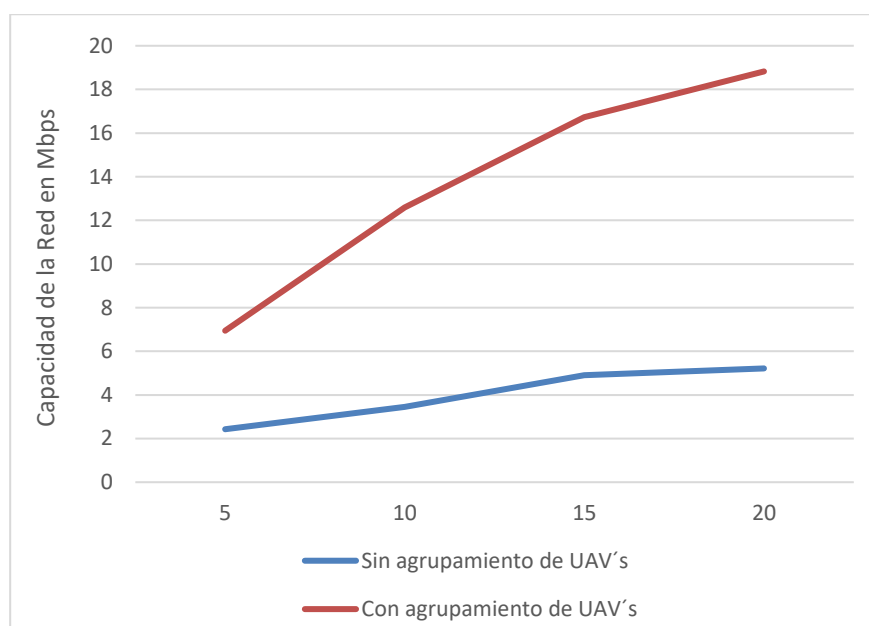
A continuación, se muestran los resultados obtenidos luego de haber realizado la simulación en MATLAB de la red celular tanto para el escenario sin agrupamiento de UAV's y el escenario con agrupamiento de UAV's.

La Figura 7 muestra la capacidad de la red en Mbps para ambos escenarios, se observa que la capacidad de la red en el escenario sin agrupamiento va desde los 2.4 Mbps en un inicio con 5 UAV's desplegados y 5.2 Mbps al terminar las interacciones con 20 UAV's desplegados, mientras que la capacidad del escenario con agrupamiento de UAV's va en un inicio desde los 6.94 Mbps hasta los 18.82 Mbps. En conclusión, al tener agrupamiento

de UAV's la capacidad en un inicio tiene un crecimiento del 387% y este porcentaje va en aumento conforme crezca el número de UAV's desplegados. El aumento de la capacidad en el escenario con agrupamiento se debe a una mejora en cuanto a la calidad de servicio de la red dado que los usuarios móviles que son servidos por UAV's estaciones base aéreas que pertenezcan a un grupo tienen como recompensa un mayor ancho de banda asignado.

Figura 7

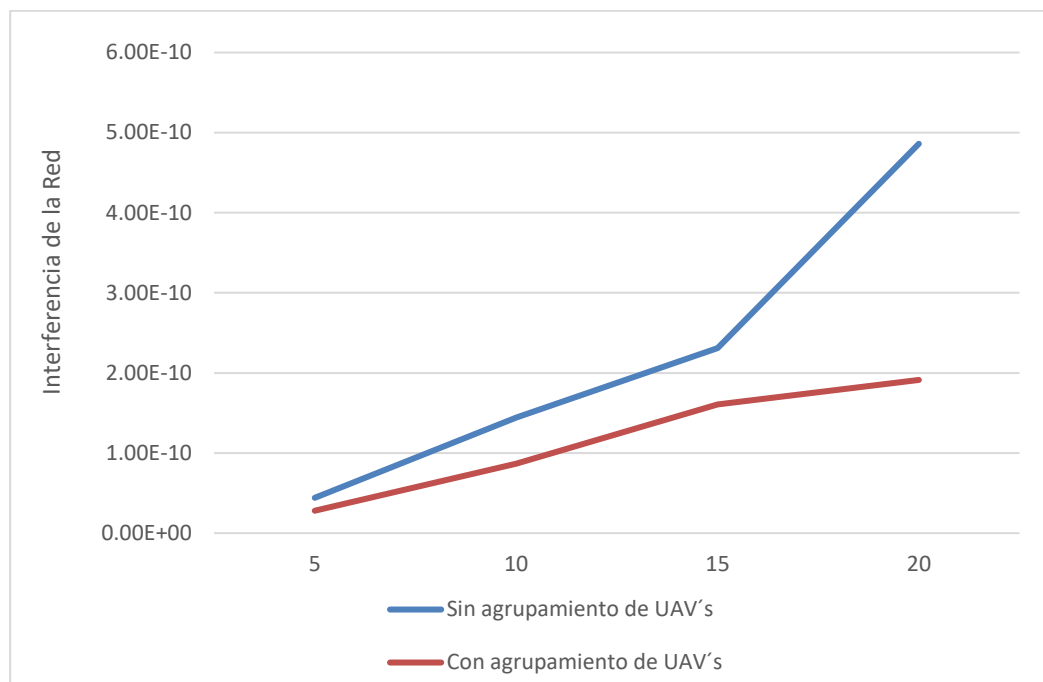
Capacidad de la red sin agrupamiento vs red con agrupamiento



En la Figura 8 se muestran los resultados de interferencia de la red de los escenarios sin agrupamiento de UAV's y con agrupamiento de UAV's, los resultados muestran que la interferencia es menor en el escenario con agrupamiento, tal como lo describe la teoría, las técnicas de agrupamiento reducen la interferencia a nivel de UAV's (co-tier) ya que se reutilizan las frecuencias de las portadoras, y esto es lo que hace el algoritmo GABGT propuesto en este trabajo para lograr un mejor rendimiento de la red. En todos los casos que describe la Tabla 2 para ambos escenarios la interferencia crece si el número de UAV's desplegados aumenta. También se observa que la diferencia entre la interferencia sin agrupamiento y la interferencia con agrupamiento es más notoria si el número de UAV's desplegados en la red es mayor.

Figura 8

Interferencia de la red sin agrupamiento vs red con agrupamiento

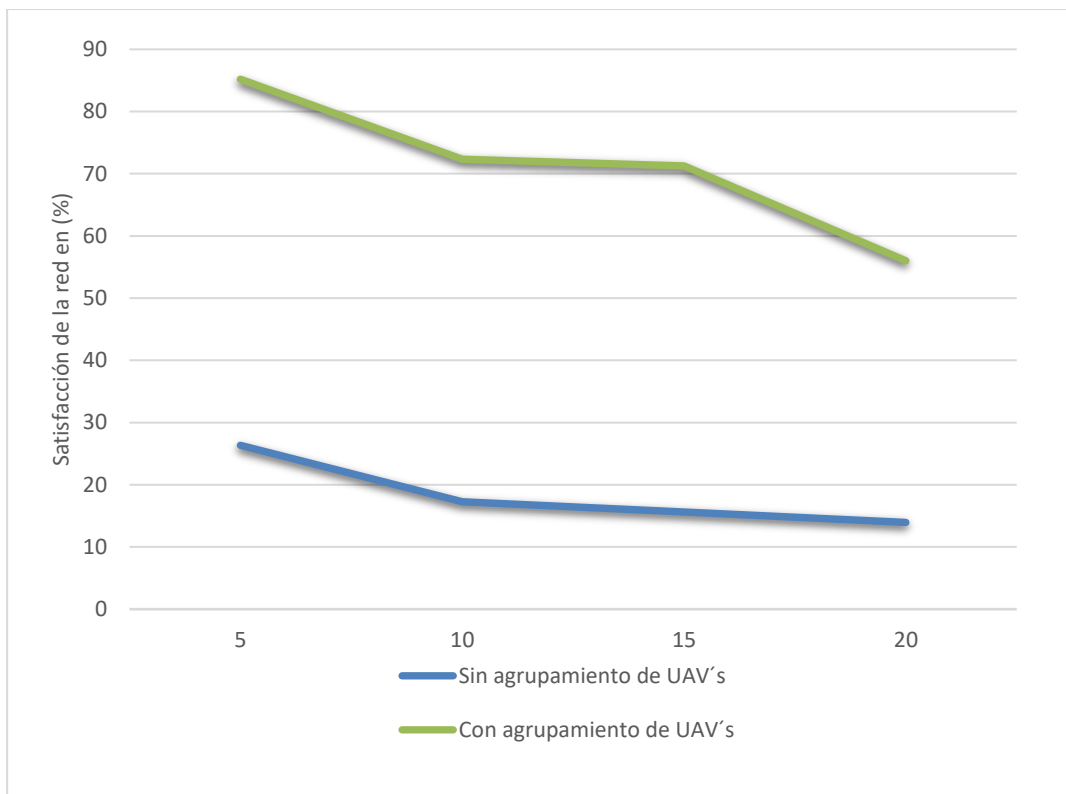


4.2 Satisfacción de la red

La satisfacción de un suscriptor se define como la relación entre la velocidad de datos asignada y la velocidad de datos demandada por cada usuario. En la Figura 9 se puede observar la satisfacción total de la red en los dos escenarios, sin agrupamiento de UAV's y con agrupamiento de UAV's mediante el algoritmo SBUG, la satisfacción en el escenario sin agrupamiento es considerablemente baja y no sobrepasa el 30 %. El modelo planteado en el presente trabajo mejora el desempeño en cuanto a satisfacción por suscriptor considerablemente entre un 40 % y 60% si se compara con la satisfacción de la red del escenario sin agrupamiento. En la Figura 9 también se observa que la satisfacción disminuye a medida que crece el número de UAV's. Esta disminución se da como consecuencia del rendimiento, que se ve afectado por la interferencia cuando crece el número de UAV's estaciones base aéreas desplegadas dentro de la red.

Figura 9

Satisfacción de la red sin agrupamiento vs red con agrupamiento

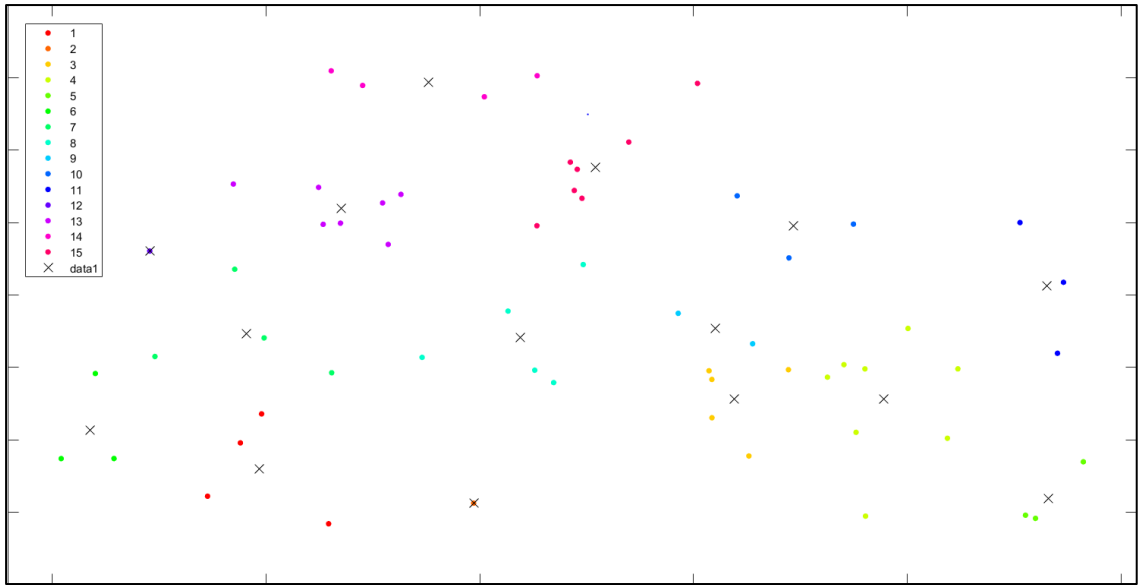


4.3 Despliegue de UAV's y usuarios móviles

Como resultado de la simulación en MATLAB de la red heterogénea descrita en el presente trabajo de titulación en la Figura 10 se muestra el despliegue de UAV's y de usuarios móviles dentro del área de cobertura de la red descrita según la Tabla 1. Cada UAV's tiene los suscriptores asignados mediante el algoritmo 1 (*K-means* para asignación de usuarios) mencionado en la sección 3 de este trabajo de titulación. En este caso en particular el número de UAV's base estación es de 15. Y el número de usuarios móviles desplegados es de 60. Las "x" simbolizan los UAV's y los puntos a los usuarios móviles.

Figura 10

Simulación en MATLAB del escenario propuesto



Conclusiones

Se abordó todos los temas relacionados con redes celulares heterogéneas, capacidad, interferencia, uso de estaciones base de baja potencia dentro de las cuales entran los UAV's, se seleccionó el UAV idóneo para este trabajo, se abordó detalladamente la teoría de juegos definiendo una estrategia eficaz de agrupamiento de UAV's, en cuanto a la asignación de recursos para la red se optó por el algoritmo WWF. Los trabajos relacionados abordados en el estado del arte dieron la pauta para el diseño del algoritmo de agrupamiento de UAV's.

Empleando la teoría de juegos se consigue diseñar y programar un algoritmo de agrupación de UAV's que funciona como estaciones base aéreas, maximizando el rendimiento de la red celular desplegada en lugares de difícil acceso o en escenarios de emergencia, consiguiendo grupos estables de UAV's. Mediante una segunda fase de agrupamiento de UAV's utilizando *K-means* se consigue que ningún UAV estación base aérea quede por fuera de un grupo, de esta manera el rendimiento de la red está garantizado.

A través del uso del algoritmo de asignación de recursos WWF antes y después del agrupamiento de UAV's estación base aéreas, se garantiza el reparto adecuado y asignación de frecuencias para cada usuario dentro de la red celular y como resultado de tener grupos estables de UAV's las frecuencias son reutilizadas y se logra disminuir la interferencia a nivel de UAV's. La capacidad de la red también se ve beneficiada por el reuso del recurso del espectro radioeléctrico disponible dentro de la red mejorando de manera considerable a medida que el número de UAV's va en aumento.

Los resultados obtenidos luego de aplicar el algoritmo de agrupación de UAV's basado en la teoría del juego SBUG y comparando con resultados obtenidos sin agrupamiento de UAV's muestran el beneficio que se obtiene al trabajar con grupos estables dentro de una red celular que puede ser desplegada en lugares de difícil acceso o en

escenarios de emergencia, tanto la capacidad y la interferencia tienen ganancias y depreciaciones en ese orden, la teoría de juegos es eficaz al momento de plantear y desarrollar un algoritmo de agrupamiento pensado en solventar el problema de asignación de recurso en una red celular.

Recomendaciones

En este trabajo de titulación se abordaron problemas de asignación de recursos en redes celulares desplegadas en lugares de difícil acceso o en situaciones de emergencia y se presentaron soluciones como el agrupamiento de estaciones base de baja potencia como son los UAV's para solventar la problemática planteada, las recomendaciones para trabajos futuros a partir de la solución planteada son las siguientes:

Utilizar nuevas técnicas de agrupamiento para la asignación de usuarios móviles que tengan mayor flexibilidad como: *Fuzzy C-means*, *K-harmonic*, entre otros.

Definir y probar nuevas estrategias de agrupación basadas en la teoría de juegos evolutivos, se puede implementar la dinámica del replicador o definir una estrategia propia con fundamento matemático sustentable.

Implementar un algoritmo de asignación de recursos diferente al usado en este trabajo, puede ser PSO, para comparar resultados en cuanto al rendimiento de la red.

Investigar técnicas de procesamiento de datos que optimicen el recurso computacional.

Referencias

- Abdelnasser, A., Hossain, E., & Kim, D. I. (2014). Clustering and Resource Allocation for Dense Femtocells in a Two-Tier Cellular OFDMA Network. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(3), 1628-1641.
<https://doi.org/10.1109/TW.2014.011614.131163>
- Akkarajitsakul, K., Hossain, E., & Niyato, D. (2013). Coalition-Based Cooperative Packet Delivery under Uncertainty: A Dynamic Bayesian Coalitional Game. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 12(2), 371-385.
<https://doi.org/10.1109/TMC.2011.251>
- Castillo, D. (s. f.). *33040062.pdf*. Recuperado 24 de agosto de 2021, de https://www.academia.edu/32303298/33040062_pdf
- Chamorro Hernández, L. V. (2017). *Evaluación de interferencias en redes heterogéneas LTE mediante el software ICS Designer*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18933>
- Cheng, N., Xu, W., Shi, W., Zhou, Y., Lu, N., Zhou, H., & Shen, X. (2018). Air-Ground Integrated Mobile Edge Networks: Architecture, Challenges, and Opportunities. *IEEE Communications Magazine*, 56(8), 26-32.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1701092>
- Control de interferencias en redes heterogéneas LTE-A con despliegues de femtoceldas—Repositorio Institucional de Documentos*. (s. f.). Recuperado 20 de septiembre de 2021, de <https://zagan.unizar.es/record/6379>
- El valor de shapley como estrategia de optimización de recursos sobre Power Line Communication (PLC)*. (s. f.). Recuperado 17 de agosto de 2021, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-91652015000200009
- Estrada, R., Otrók, H., & Dziong, Z. (2016). A novel cluster based resource sharing model for femtocell networks. *Computer Communications*, 94, 85-102.
<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.07.015>

- Feng, M., Mao, S., & Jiang, T. (2016). Enhancing the performance of future wireless networks with software-defined networking. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 17(7), 606-619. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1500336>
- K Means | PDF | Cluster Analysis | Image Segmentation*. (s. f.). Scribd. Recuperado 18 de agosto de 2021, de <https://www.scribd.com/document/460146279/K-means>
- Magín, M. M., Domínguez, J. V., & Flórez, V. Q. (2013). Interferencia co-canal en redes heterogéneas. *INGE CUC*, 9(1), 143-162.
- Mittal, V., Maghsudi, S., & Hossain, E. (2021). Distributed Cooperation Under Uncertainty in Drone-Based Wireless Networks: A Bayesian Coalitional Game. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TMC.2021.3073772>
- Muñoz, C. A. N., & Narváez, J. I. T. (s. f.). *ANÁLISIS DEL THROUGHPUT DE UNA RED HETEROGÉNEA QUE IMPLEMENTE UN ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO BASADO EN TEORÍA DE JUEGOS*. 137.
- Nair, A. (2019, agosto 16). Beginner's Guide To K-Means Clustering. *Analytics India Magazine*. <https://analyticsindiamag.com/beginners-guide-to-k-means-clustering/>
- Network Management Software | Network Management Tools—ManageEngine OpManager*. (s. f.). Recuperado 5 de noviembre de 2020, de https://www.manageengine.com/network-monitoring/network-management.html?network=g&device=c&keyword=networking%20management&campaignid=11500307249&creative=476041442875&matchtype=p&adposition=&placement=&adgroup=119117510584&targetid=kwd-297395862126&gclid=CjwKCAiA4o79BRBvEiwAjteoYJAFL1ZMzE1Cqc-CAC8sCFC7q1V_CsnM9CnWCDfdSG-mzUNrp1FAxxoC8EcQAvD_BwE
- Ortiz, A. E. A. (s. f.). *Centralized and Distributed Resource Allocation with Applications to Signal Processing in Communications*. 209.
- Parra, J. V., Bernal, P., & Lara, R. (s. f.). *PLAN DE NEGOCIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE REDES HETEROGÉNEAS (HETNET) PARA PROVEEDORES DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES*. 12.

- Phantom 4 Pro—DJI*. (s. f.). DJI Official. Recuperado 12 de febrero de 2021, de <https://www.dji.com/phantom-4-pro>
- Piedra Cevallos, B. P. (2020). *Escalabilidad de redes macro—Femtocelulares bajo el agrupamiento de femtoceldas*. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/26199>
- Radio Resource Management in Multi-Tier Cellular Wireless Networks | Wiley*. (s. f.). Recuperado 17 de agosto de 2021, de <https://www.wiley.com/en-ad/Radio+Resource+Management+in+Multi+Tier+Cellular+Wireless+Networks-p-9781118502679>
- Rohoden, K., Estrada, R., Otrok, H., & Dziong, Z. (2018a). Stable femtocells cluster formation and resource allocation based on cooperative game theory. *Computer Communications*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2018.11.004>
- Rohoden, K., Estrada, R., Otrok, H., & Dziong, Z. (2018b). Stable femtocells cluster formation and resource allocation based on cooperative game theory. *Computer Communications*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2018.11.004>
- Rohoden, K., Estrada, R., Otrok, H., & Dziong, Z. (2020). Evolutionary game theoretical model for stable femtocells' clusters formation in HetNets. *Computer Communications*, 161, 266-278. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.07.041>
- Romero Palop, J. de D. (2015). *Aplicación de la Teoría de Juegos de Utilidad Transferible a los Sistemas de Recomendación a Grupos*. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/668987>
- Romero_Palop_JuanDeDios_tfg.pdf*. (s. f.). Recuperado 18 de agosto de 2021, de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/668987/Romero_Palop_JuanDeDios_tfg.pdf?sequence=1
- Sekander, S., Tabassum, H., & Hossain, E. (2020). Statistical Performance Modeling of Solar and Wind-Powered UAV Communications. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TMC.2020.2983955>
- Sepope juegos.pdf*. (s. f.). Recuperado 24 de agosto de 2021, de <https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/paperspdf/sepope%20juegos.pdf>

- Shi, Y., Zhu, G., Lin, S., Ding, J., & Xu, S. (2015). Coalitional Game Theory for Cooperative Interference Management in Femtocell Networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, e767649. <https://doi.org/10.1155/2015/767649>
- Shu, Z., Qian, Y., & Ci, S. (2013). On Physical Layer Security for Cognitive Radio Networks. *Network, IEEE*, 27, 28-33. <https://doi.org/10.1109/MNET.2013.6523805>
- Slantchev, B. L. (s. f.). *Game Theory: Preferences and Expected Utility*. 19.
- Small Cell Networks and the Evolution of 5G - Qorvo*. (s. f.). Recuperado 17 de agosto de 2021, de <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>
- Sun, J., Li, B., Jiang, Y., & Wen, C. (2016). A Camera-Based Target Detection and Positioning UAV System for Search and Rescue (SAR) Purposes. *Sensors*, 16(11), 1778. <https://doi.org/10.3390/s16111778>
- Szabó, G., & Fáth, G. (2007). Evolutionary games on graphs. *Physics Reports*, 446(4-6), 97-216. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2007.04.004>
- Vélez Díaz, J. C., Viñas, J. A., & García, J. A. (2012). Método para estimar el throughput promedio de los usuarios de una estación base en servicio utilizando simulación Monte Carlo. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 35(2), 190-199.
- Volumen+1%2FCapítulo+1.pdf*. (s. f.). Recuperado 18 de agosto de 2021, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11847/fichero/Volumen+1%252FCap%C3%ADtulo+1.pdf>
- Xu, M., Chen, Y., & Wang, W. (2020). A Two-stage Game Framework to Secure Transmission in Two-Tier UAV Networks. *ArXiv:2009.09887 [Cs]*. <http://arxiv.org/abs/2009.09887>
- Yang, S. C. (2010). *OFDMA System Analysis and Design*. Artech House.
- Zhao, H., Yan, A., Zhang, C., & Wang, P. (2012). An optimizing method based on Water-Filling for Case Attribute weight. *2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 3455-3458. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2012.6244551>

Zheng, H., Hou, S., Li, H., Song, Z., & Hao, Y. (2018). Power Allocation and User Clustering for Uplink MC-NOMA in D2D Underlaid Cellular Networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, *PP*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2845398>

Apéndice

Apéndice 1:

Lista de abreviaturas

BS	Estación base
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código
CH	Líder de grupo
CPC	Canal Piloto Cognitivo
DL	Enlace descendente
DTMC	Modelo de Cadena de Markov en Tiempo Discreto
EES	Estrategia Evolutiva Estable
EGT	Teoría de Juegos Evolutivos
HetNets	Redes Heterogéneas
LTE	Evolución a Largo Plazo
MC	Macro celda
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales
PSO	Optimización de Enjambre de partículas
SBUG	Agrupación de UAV's basado en Shapley
UA	Conjunto de Drones Desplegados
UAV	Vehículo Aéreo no Tripulado
UM	Usuarios Móviles
WWF	Llenado de Agua Ponderado
BS	Estación base
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código
CH	Líder de grupo
DL	Enlace descendente
DTMC	Modelo de Cadena de Markov en Tiempo Discreto

EES	Estrategia Evolutiva Estable
EGT	Teoría de Juegos Evolutivos
GT	Teoría de juegos
HetNets	Redes Heterogéneas
LTE	Evolución a Largo Plazo
MC	Macro celda
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales
PSO	Optimización de Enjambre de partículas
SBUG	Agrupación de UAV's basado en Shapley
UA	Conjunto de Drones Desplegados
UAV	Vehículo Aéreo no Tripulado
UC	Dron estación base
UM	Usuarios Móviles
WWF	Llenado de Agua Ponderado

Apéndice 2:**Lista de símbolos**

φ_i	Valor de Shapley por jugador
$AB_{clusters}$	Ancho de banda para clústeres
AB_s	Ancho de banda para cada subportadora
A_g	Conjunto de UAV's pertenecientes a un grupo g .
CS_{ex}	Subportadoras extras.
L_0	Péerdidas de camino
N_0	Ruido
P_t^{AC}	Potencia transmitida por AC
P_t^{MC}	Potencia transmitida por MC
SC_{UAV}	Conjunto de subportadoras para el nivel UAV-celular
SC_{macro}	Conjunto de subportadoras para el nivel macro-celular
$SINR_u^{s,a}$	Relación señal a interferencia más ruido.
V_{co}	Valor de utilidad transferible de la coalición.
$V_u^{s,a}$	Velocidad de datos asignados por usuario móvil
f_c	Frecuencia de la portadora
n_s	Número de subportadoras
u_a	usuario servido por UAV.
α_u^a	Usuarios móviles servidos por UAV
$\beta_u^{s,a}$	Subportadora s está asignanda al usuario u en el UAV a .
$\bar{\gamma}$	Recompensa promedio
γ_a	Recompensa del UAV
γ_g	Recompensa del grupo
δ_A	Radio UAV
δ_{MC}	Radio macro celda
ε_a^s	Eficiencia espectral del UAV a en la suportadora s .

CS	Conjunto de subportadoras
h	Tamaño de coalición
A	Conjunto de dDrones (UAV's)
G	Conjunto de grupos
N	Conjunto de jugadores
UM	Conjunto de usuarios móviles
a	Dron (UAV)
e	Conjunto de estrategias
pe	Peso de cada jugador.
s	Subportadora
u	Usuario móvil
ε	Vector de variables binarias