



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales no Renovables

Maestría en Telecomunicaciones

**Análisis comparativo de sistemas de balanceo de carga aplicados a
redes móviles de última generación**

Trabajo de Titulación previo a la
obtención del título de Magíster en
Telecomunicaciones.

AUTOR:

Ing. Karol Nayeli Quezada Ríos

DIRECTOR:

Ing. Renato Benjamín Torres Carrión Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2023



Certificación

Loja, 13 de julio de 2023

Ing. Renato Benjamín Torres Carrión Mg. Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Análisis comparativo de sistemas de balanceo de carga aplicados a redes móviles de última generación**, previo a la obtención del título de **Magíster en Telecomunicaciones**, de la autoría del estudiante **Karol Nayeli Quezada Ríos**, con **cédula de identidad N° 1104194335**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.



Firmado electrónicamente por:
**RENATO BENJAMIN
TORRES CARRION**

Ing. Renato Benjamín Torres Carrión Mg. Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN



Autoría

Yo, Karol Nayeli Quezada Ríos, declaro ser autora del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación del Trabajo de Titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula de Identidad: 1104194335

Fecha: 13/07/2023

Correo electrónico: karol.n.quezada@unl.edu.ec

Teléfono: 0981150113



Carta de autorización por parte de la autora, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Karol Nayeli Quezada Ríos**, declaro ser autora del Trabajo de Titulación denominado: **Análisis comparativo de sistemas de balanceo de carga aplicados a redes móviles de última generación**, como requisito para optar el título de **Magíster Telecomunicaciones**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los trece días del mes de julio de dos mil veintitrés.

Firma:

Autora: Karol Nayeli Quezada Ríos

Cédula de identidad: 1104194335

Dirección: Loja

Correo Electrónico: karol.n.quezada@unl.edu.ec

Teléfono: 0981150113

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Renato Benjamín Torres Carrión Mg. Sc.



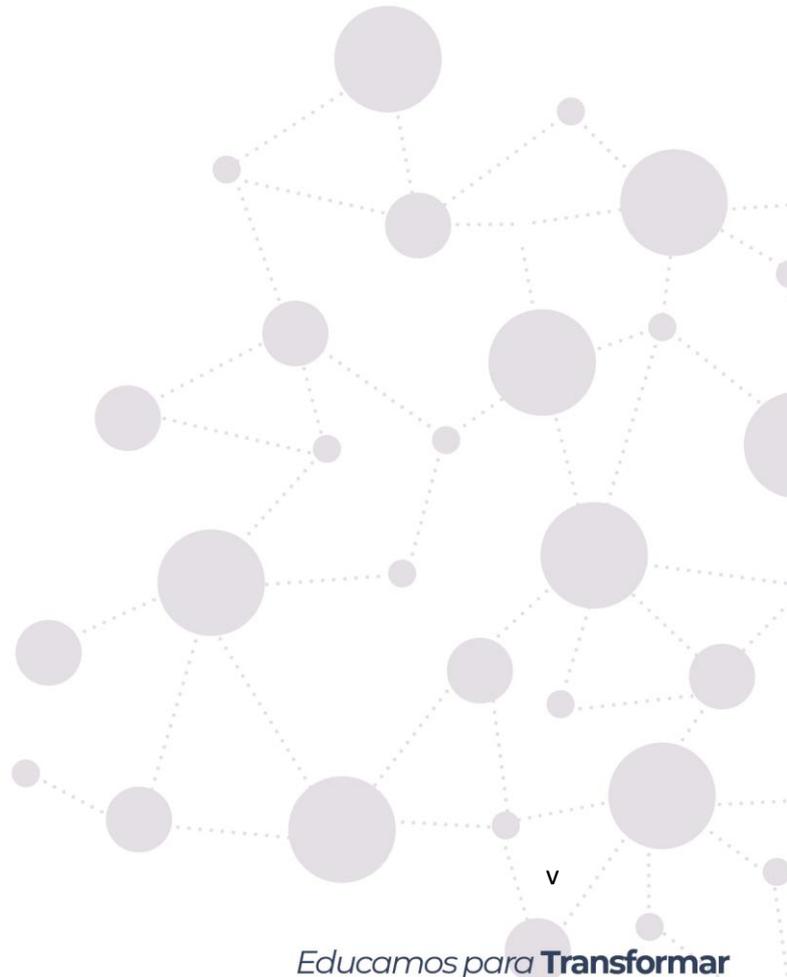
Dedicatoria

Le dedico este trabajo principalmente a Dios, por acompañarme y permitirme llegar a este punto, por ser mi fortaleza y por brindarme su infinita bondad y amor.

A mis queridos padres por ser siempre mi fuente de inspiración, motivación y por brindarme todo su apoyo para alcanzar mis metas, en especial a mi madre, este Trabajo de Titulación es un tributo a tu amor y fortaleza, te amo y te admiro por todo lo que has hecho por mí.

Finalmente, a mi pareja y amigos quienes han sido un gran apoyo emocional y parte importante de este proceso.

Karol Nayeli Quezada Ríos





Agradecimiento

Primero agradezco a Dios y a la Virgen del Cisne por brindarme salud y fortaleza para lograr mis objetivos.

A mis padres quienes han sido el motor que impulsa mis sueños, por todo el esfuerzo y confianza que han depositado en mí, por motivarme a seguir adelante y por ser mis pilares de apoyo durante toda mi vida. Gracias por ser mi guía y mi luz.

A mi pareja quien ha sido el más grande apoyo y compañero en este proceso, a todas esas personas especiales en mi vida, por involucrarse en cada paso que doy y por confiar en mi capacidad y entrega.

Finalmente quiero expresar un sincero agradecimiento a mi tutor el Ing. Renato Torres, Mg. Sc, por su dedicación y paciencia, por su compromiso y guía durante el desarrollo y cumplimiento del presente trabajo, a todos los docentes de la Universidad quienes compartieron su tiempo y conocimientos para ayudarme a llegar al punto donde me encuentro hoy.

Karol Nayeli Quezada Ríos

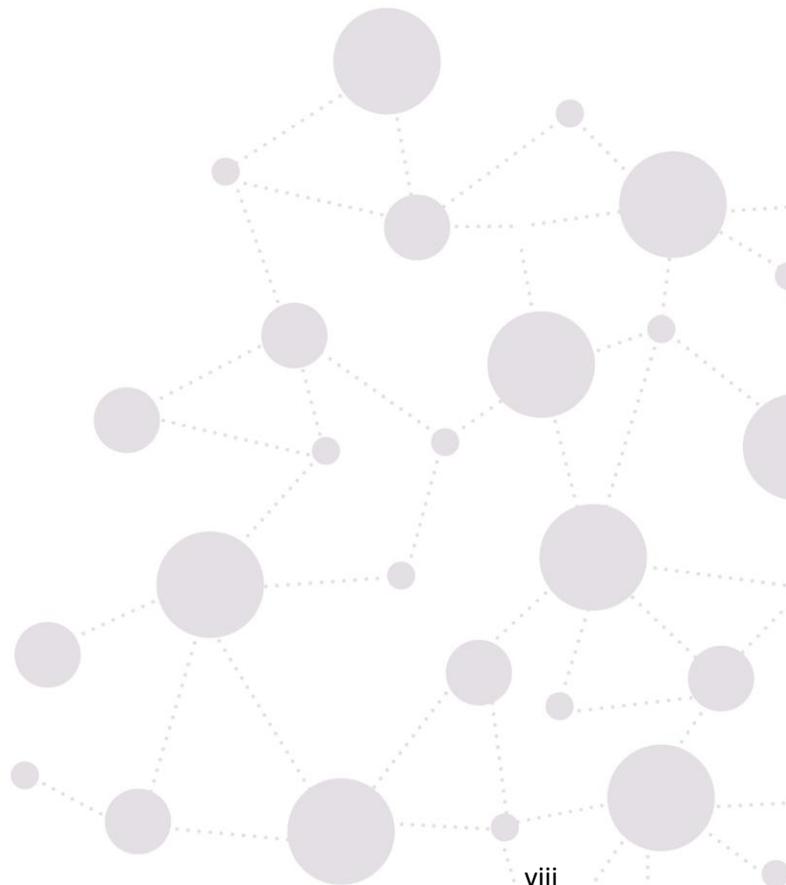


Índice de Contenidos

Portada.....	i
Certificación.....	ii
Autoría.....	iii
Carta de autorización.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice de contenidos.....	vii
Índice de tablas.....	ix
Índice de anexos.....	x
1. Título	1
2. Resumen	2
2.1. ABSTRACT	3
3. Introducción.....	4
4. Marco teórico.....	7
4.1. CRITERIOS DE HANDOVER	7
4.2. CONTROL DE POTENCIA.....	9
4.3. LOCALIZACIÓN	10
5. Metodología.....	11
5.1 SISTEMAS DE BALANCEO DE CARGA	11
5.1.1 Metodología de handover.....	11
5.1.2 Margen de histéresis (HOM).....	13
5.1.3 Time to trigger (TTT).....	13
5.2 TIPOS DE SISTEMAS DE BALANCEO DE CARGA	14
5.2.1 Sistemas clásicos	14
5.2.2 Sistemas modernos.....	16
5.2.3 Sistemas híbridos.....	19
5.2.4 Análisis comparativo.....	22
6 Resultados	26



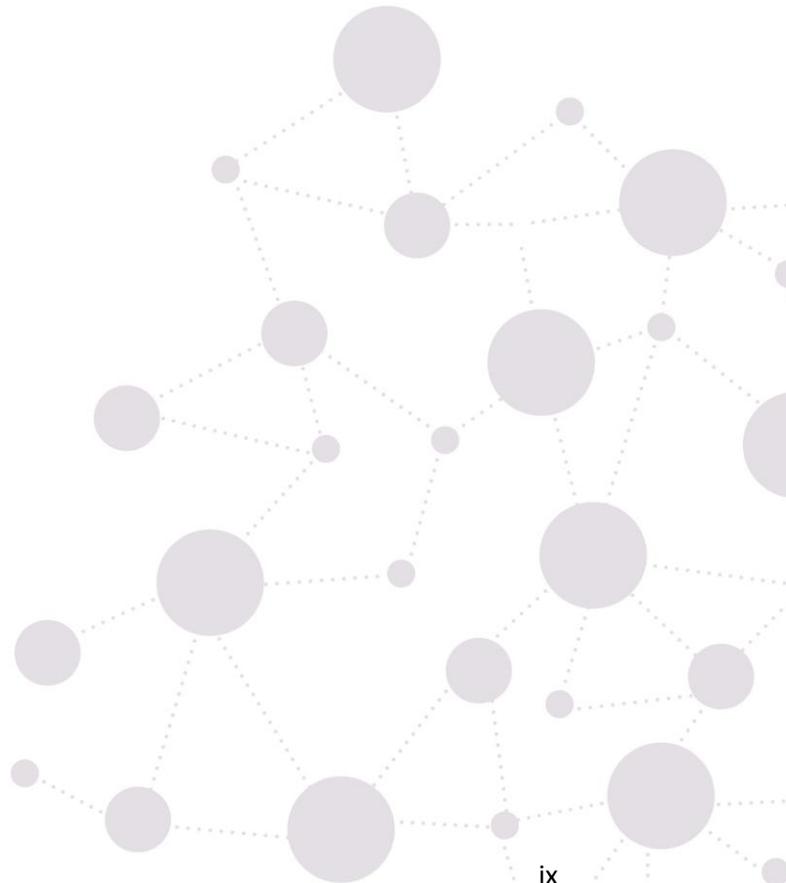
7	Discusión	32
8	Conclusiones	33
9	Recomendaciones	34
10	Bibliografía	35
11	Anexos	38





Índice de Tablas:

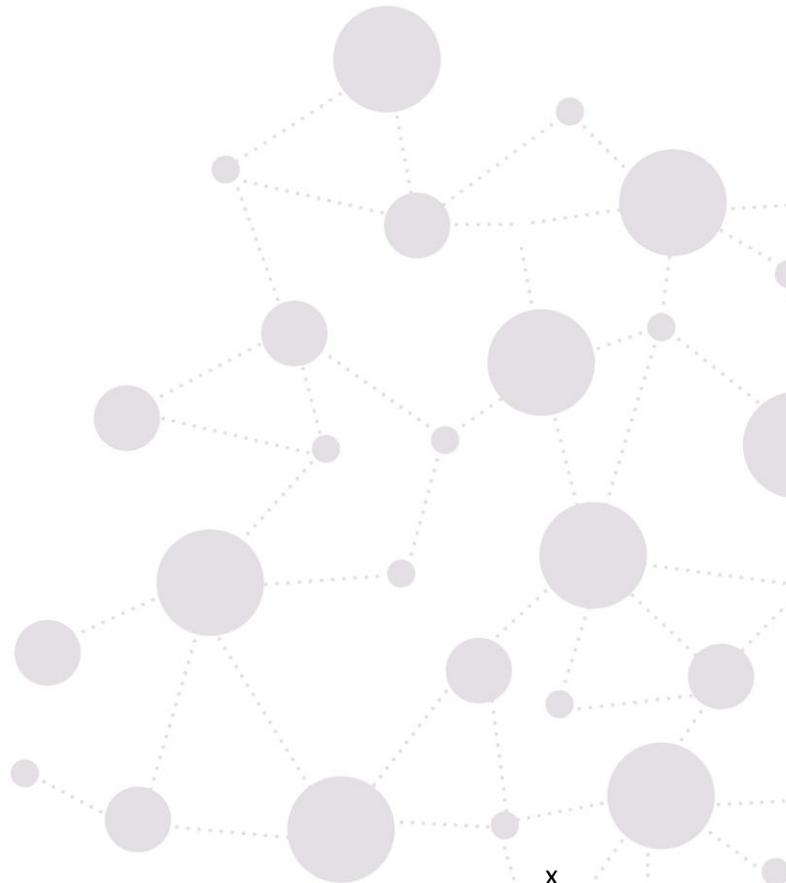
Tabla 1. Parámetros de configuración escenario de prueba	25
Tabla 2. Caracterización de los sistemas de balanceo de carga.....	26
Tabla 3. Resultados comparativos	31





Índice de Anexos

Anexo 1. Certificado de traducción.....	38
--	----





unl

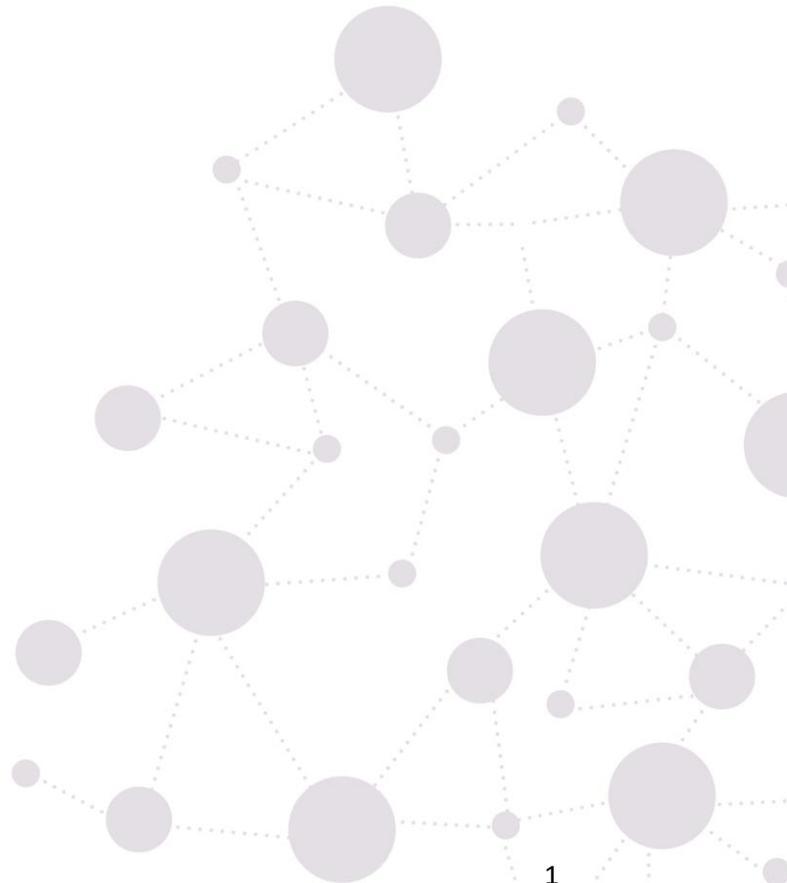
Universidad
Nacional
de Loja

POSGRADO

Maestría en
Telecomunicaciones

1. Título

Análisis comparativo de sistemas de balanceo de carga aplicados a redes móviles de última generación.



2. Resumen

Ante la gran demanda de capacidad de una red producida por la congestión que existe por el aumento de usuarios y dispositivos móviles de gama alta, surge la necesidad de equilibrar la carga generada por el consumo de datos mediante técnicas de optimización de las redes celulares, de manera que se brinde una correcta asignación de recursos y se permita una mayor calidad de servicio para el usuario. Siendo este el principal objetivo de los sistemas de comunicación móvil de quinta generación (5G) para atender el creciente volumen de usuarios el tráfico de datos.

En este trabajo se presenta una revisión y posterior análisis comparativo acerca de varias técnicas de balanceo de carga que se utilizan en las redes móviles, donde se realizó una clasificación de las mismas entre clásicas, modernas e híbridas tomando en cuenta la caracterización de un escenario de prueba con aglomeraciones sociales que es donde comúnmente se presentan problemas de red debido al tráfico generado en puntos específicos. Por ello a partir de indicadores cualitativos se hizo una ponderación en base a las características del escenario para obtener indicadores cuantitativos que nos permitan determinar las técnicas más adecuadas para dicha caracterización.

Palabras Clave: *balance de carga, calidad de servicio, redes móviles, análisis comparativo, sistemas de optimización.*

2.1. Abstract

Given the high demand for network capacity caused by congestion resulting from the increased number of high-end mobile devices and users, there is a need to balance the load generated by data consumption through cellular network optimization techniques. These strategies will ensure proper resource allocation and provide a higher quality of service for the user. This is the main objective of fifth-generation (5G) mobile communication systems in addressing the growing volume of user data traffic. This work presents a review and comparative analysis of various load-balancing techniques used in mobile networks. The techniques are classified into classical, modern, and hybrid categories, considering the characterization of a test scenario with social gatherings, where network problems commonly arise due to traffic generated at specific points. Therefore, based on qualitative indicators, a weighting was performed considering the scenario's characteristics to obtain quantitative indicators that allow us to determine the most suitable techniques for this characterization.

Keywords: *load balancing, quality of service, mobile networks, comparative analysis, optimization systems.*

3. Introducción

El uso de tecnologías digitales se ha tornado en una parte fundamental dentro de la vida cotidiana de las personas, convirtiéndose en el papel principal del entorno social. En este sentido la relación tecnología-comunicación también se ha visto favorecida al reducir las limitantes para mantenernos en contacto de una manera más fácil, sin importar la distancia ni tiempo.

De este modo la telefonía móvil permite la comunicación mediante la interconexión entre centrales móviles y públicas, con funcionalidades que van más allá de poder realizar únicamente llamadas o enviar mensajes de texto (SMS), es decir se han incorporado funciones adicionales que permiten navegar por internet agilizando la interacción entre usuarios.

Para satisfacer estos requisitos que cada vez son más complejos, las redes móviles ofrecen transmisión de datos para brindar todo tipo de servicios mediante conexiones inalámbricas e infraestructura física. Uno de los principios fundamentales aplicados en una red móvil se basa en una estación base que cubre un área delimitada y la divide en áreas parciales más pequeñas denominadas celdas, donde se conducen las comunicaciones en formas de onda de radio desde la central del operador hasta los terminales de los usuarios. Bajo este contexto las redes móviles permiten al usuario moverse con libertad bajo la zona cubierta y mantener una conexión de datos sin pérdidas. (Herrera, 2007)

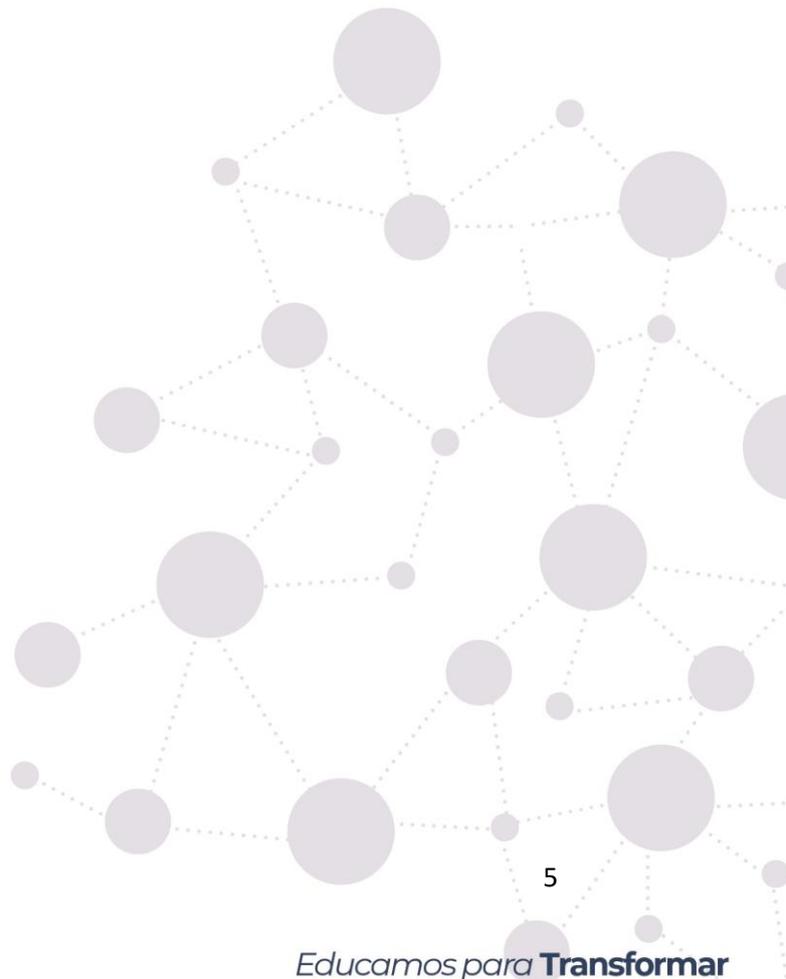
En este marco se han generado problemáticas de sobrecarga en el envío y recepción del tráfico contribuyendo a la congestión de la red, para lo cual se han estudiado alternativas que impliquen el transporte óptimo de datos y alternativas que eleven el rendimiento de la red.

Los sistemas de balanceo de carga son una técnica clave para evitar la sobrecarga y problemas en la red móvil, de manera que se realiza un proceso de compartición de cargas entre las celdas de una zona logrando una correcta distribución del tráfico de datos. Este modo de operación funciona bajo el principio de que un terminal móvil se comunica siempre con la estación base más cercana por lo tanto si el usuario se mueve, cambia automáticamente a la estación base de la célula vecina. (Piedra & Suarez, 2022)



Sin embargo, los sistemas de balanceo de carga no logran cubrir el desequilibrio de carga generado ante el comportamiento de los usuarios, es decir en determinados espacios sociales donde debido a la aglomeración y el tráfico de datos, el rendimiento de la red se ve afectado.

Para ello en este trabajo se realiza un análisis comparativo de sistemas de balanceo de carga mediante la obtención de parámetros sociales, es decir usando las fuentes de datos sociales como calendarios, redes sociales, navegadores, big data, etc. (Fortes et al., 2018) de manera que mediante la predicción de ciertos eventos multitudinarios se pueda optimizar estos procesos de balance de carga en una red móvil.



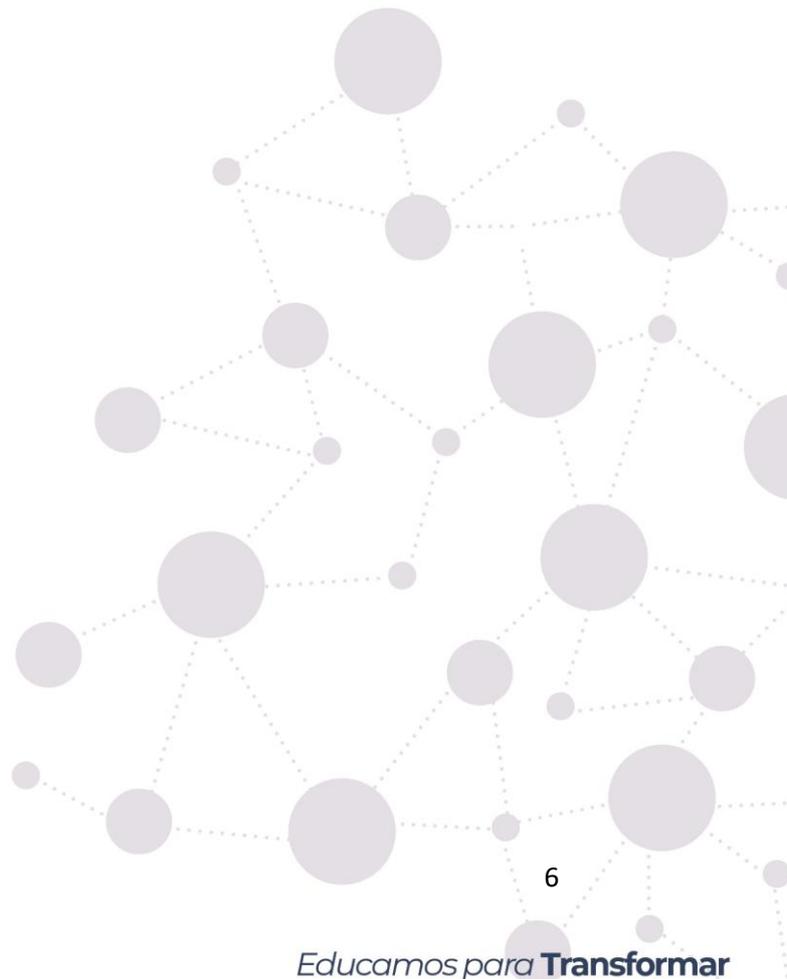
Objetivos

Objetivo general

Analizar cualitativamente las características, usos y funcionalidades de sistemas de balanceo de carga clásicos y actuales con el objetivo de solventar los problemas de capacidad de transferencia de datos, retardos y consumo energético de equipos de usuario en redes móviles de última generación.

Objetivos específicos

- Recopilar y organizar información sobre el estado del arte con respecto a sistemas de balanceo de carga en redes móviles de última generación.
- Identificar las diferencias y características de cada uno de los sistemas de balanceo de carga para redes móviles de última generación.
- Contrastar entre sistemas de balanceo de carga que usen información de parámetros clásicos de la red móvil y parámetros sociales.



4. Marco teórico

En este capítulo se describe de manera resumida los métodos de gestión de recursos radio para balanceo de carga. Estos métodos envuelven estrategias y algoritmos para controlar parámetros como la potencia de transmisión, la localización, los criterios de handover, entre otros. A continuación, se recopila algunos documentos sobre el uso de los parámetros mencionados y su aplicación en balanceo de carga.

4.1. Criterios de handover

Uno de los principales criterios de balanceo de carga es el margen de handover. Como se muestra en (Goes, 2009) existen varias formas de contrastar métodos de handover. En este caso se comparan el método HO y HO SS a través de los resultados obtenidos de tasa relativa, las ganancias y la eficiencia de red, en diferentes escenarios rurales, urbanos y suburbanos, con el fin de validar la influencia del medio ambiente en estos métodos, concluyendo que existe una ganancia significativa en la capacidad o eficiencia de la red utilizando el método HO.

De la misma forma en (Ray & Tang, 2015) se proponen métodos de equilibrio de carga de movilidad (MLB) para redes heterogéneas, donde los autores realizan una investigación sobre el margen de histéresis (HM) y la compensación individual de celda (CIO) los cuales no tienen valores fijos para todas las celdas, posterior a este análisis proponen un algoritmo que calcula el margen de histéresis adaptativo y el equilibrio de carga en una red heterogénea.

En este documento se realiza una comparación entre dos esquemas mediante una simulación donde se analiza que en el esquema original MLB opera sin restricción y en el esquema propuesto la operación de MBL está restringida en el rango permitido para evitar problemas de carga, comprobando que el traspaso, la tasa RLF y el efecto ping-pong son significativamente mejor gracias al ajuste de parámetros CIO acorde a la distribución de celdas vecinas.

En (Becvar & Mach, 2010) se propone la adaptación del nivel real del margen de histéresis según la posición del usuario en una celda, a través de un mecanismo que requiera la menor cantidad de requisitos sobre la red y el equipo de usuario. En la implementación de HM la decisión y el inicio del traspaso se basan en una comparación

de varios parámetros de señal (SINR o RSSI) de una BS en servicio y una de destino. Los autores de (Ray & Tang, 2015)(Becvar & Mach, 2010) dicen que normalmente el nivel de histéresis es constante, en cambio el HM adaptativo se basa en la modificación del valor real de HM en función de la posición del usuario en la celda. El HM disminuye a medida que los UE se acercan al borde de la celda dado que su forma es fuertemente influenciada por las interferencias debido a que el sistema no está limitado por la distancia o el nivel de señal. El HM adaptativo reduce la cantidad de traspasos redundantes mientras mantiene la ganancia de rendimiento de las femtoceldas de acceso abierto/híbrido lo más alta posible. En comparación con el HM adaptativo anterior que requiere información exacta del radio de la celda y de las distancias, esta técnica no necesita esta información.

Aun así, los resultados entre ambos métodos muestran un rendimiento similar, haciendo preferible la implementación de este método en redes con femtoceldas, debido a que la SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, relación señal a interferencia más ruido) no es tan sensible a una configuración inexacta de sus parámetros, pero ambas técnicas superan al HM convencional.

Otro de los parámetros de gestión de recursos radio relacionados con el proceso de handover es el TTT (tiempo de activación). Por ejemplo, en el trabajo de (Lee et al., 2010) se evalúa el rendimiento de HO cuando se aplican varios métodos de TTT, en función de la velocidad de los UE (equipos de usuario) y de las configuraciones de células. Inicialmente seleccionan valores TTT adaptativos para cada velocidad de UE en los escenarios macro-macro HO y macro-pico HO. A partir de esto (Lee et al., 2010) sugiere los criterios de agrupación de las velocidades de los UE y los valores TTT adecuados a las configuraciones de celda. El autor realiza una evaluación del rendimiento de HO para los distintos escenarios, mostrando como resultado que el rendimiento cuando se aplican valores TTT sugeridos en función de los rangos de velocidad son comparables al del caso en que se aplicó los valores TTT adaptativos para una velocidad de UE arbitraria ya que se comprobó que el rendimiento mejora significativamente en comparación con el de los casos en los que se aplica un valor TTT fijo en ambas configuraciones de tipo de célula.

4.2. Control de potencia

El control sobre la potencia de transmisión permite reducir la interferencia co-canal, maximizar la capacidad de la red y minimizar el uso de energía. El autor en (Alsuhli et al., 2021) realiza un análisis recopilando varias técnicas estudiadas por otros autores sobre la distribución de carga mediante diferentes algoritmos que trabajan ajustando la potencia de transmisión para lograr el equilibrio de carga, para lo cual proponen un nuevo modelo de equilibrio de carga que intente superar los problemas de los modelos anteriores, haciendo un ajuste de los parámetros de CIO (Cell Individual Offset) y la sintonización de la potencia de transmisión de los nodos de la red, para controlar el traspaso de usuarios.

Con el fin de equilibrar la carga, se han diseñado estrategias enfocándose en el método de polarización para la descarga de la red. En (Zhou et al., 2018) se presentan algunos análisis de convergencia y complejidad de algoritmos y en base a eso, proponen una estrategia que brinda mayor rendimiento que las convencionales, logrando equilibrio de carga y eficiencia energética. El algoritmo propuesto combina el control de potencia con una solución iterativa de dos capas. En la externa, se realiza una asociación de usuarios maximizando la suma ponderada de las tasas efectivas que representan los parámetros de throughput, número de usuarios por celda y consumo de energía, mientras que la capa interna actualiza la potencia de transmisión de cada BS utilizando una función específica de actualización de potencia.

En el trabajo de (Mishra & Mathur, 2014) se presentan varias técnicas de equilibrio de carga que se utilizan en las redes móviles, entre enfoques clásicos y técnicas híbridas. Se representa un contraste entre el método de adaptación de potencia y HO, ya que según el autor en el esquema de modificación de potencia, la cobertura de celdas congestionadas se contrae o se amplía acorde a la potencia recibida, por lo tanto está expuesta a presentar inconvenientes en celdas sobrecargadas degradando la cobertura interior, y en consecuencia precisar amplificadores de potencia, mientras que el método de traspaso es una de las técnicas más efectivas y prometedoras debido a su flexibilidad y efectividad en redes celulares complejas.

Por otro lado, en (Wattenhofer et al., 2001) (Narayanaswamy et al., 2002) se realiza un estudio de la interferencia y su relación con el control de potencia de transmisión en redes, usando diferentes topologías donde se demuestra que los usos de estos protocolos

mejoran el throughput de la red, garantiza la conectividad y maximiza la capacidad de transporte de tráfico.

4.3. Localización

Ante el comportamiento de los usuarios en determinados espacios sociales (Zheng et al., 2016) explica los beneficios de impulsar Big Data y su integración en la optimización de la red, mediante la exploración de varias técnicas de recopilación y análisis de datos que permitan la optimización de la red, además presenta 3 casos de estudio de esquemas de Big Data para demostrar posibles soluciones que mejoren el rendimiento de las redes móviles hacia 5G.

En las redes móviles, las multitudes o eventos sociales donde hay aglomeración de personas, son clave para el rendimiento de la red, en (Fortes et al., 2018) se proponen casos de estudio para la aplicación de información de datos sociales, los cuales se adquieren en base a datos de eventos y calendarios a la gestión de redes celulares. Al igual que (Zheng et al., 2016) menciona que la disponibilidad y capacidad de los datos sociales, fusión de datos y técnicas de Big Data deben estar integrados en la gestión de redes celulares, de manera que se permita un ajuste entre los servicios de red y la demanda cambiante de los usuarios.

Siguiendo este contexto, (Zheng et al., 2016) presenta un documento donde combina la detección de eventos urbanos del mundo real con el equilibrio de carga proactivo, es decir propone que la detección de eventos pronostiquen los cambios en los puntos de acceso celular bajo técnicas y función de datos propuestas en (Zheng et al., 2016)(Fortes et al., 2018)(Zheng et al., 2016), y simula una estrategia proactiva de equilibrio de carga 5G teniendo en cuenta la predicción de puntos de acceso distribuidos en áreas urbanas para configurar automáticamente los márgenes de las celdas. Finalmente, la optimización de estos esquemas proactivos beneficia también el almacenamiento en caché proactivo y la gestión de interferencias en la red celular.

5. Metodología

Para el desarrollo del presente Trabajo de Titulación se hizo uso de la metodología cualitativa, recopilando características fundamentales de diferentes técnicas de balanceo de carga. Luego a partir de esto, se ponderan las características en base al escenario planteado y finalmente, utilizando esta ponderación, se aplica el método cuantitativo basado en criterios clave de cada técnica antes mencionada.

5.1 Sistemas de balanceo de carga

Las telecomunicaciones son el principal recurso para la conectividad y el funcionamiento de los teléfonos móviles, los cuales se basan en procedimientos de redes de telefonía fija, bajo un principio fundamentado en la división de territorio en pequeñas áreas parciales, gestionadas por una estación base. Las redes celulares requieren de una colección de funciones para la configuración, optimización y mantenimiento automático en tanto que cubra el aumento exponencial de la tasa de usuarios sin afectar la QoS (Quality of service, Calidad de servicio) de la red.

A medida que el usuario final usa los recursos de la red mientras se mueve de un límite de celda a otro, la carga de tráfico no permanece constante, por lo cual el equilibrio de carga es uno de los principales campos de investigación en las redes celulares, ya que su implementación implica la transferencia de carga de las celdas sobrecargadas a las celdas vecinas con recursos libres para una distribución de carga más equilibrada a fin de mantener la experiencia del usuario final y el rendimiento de la red adecuados.

5.1.1 Metodología de handover

Este proceso es utilizado para equilibrar la carga al transferir al usuario de una celda a otra. Este traspaso gestiona un cambio de la BS que está brindando el servicio a otra BS más apropiada, logrando que el número de usuarios de las celdas congestionadas se reduzca y el número de las celdas adyacentes aumente acorde al movimiento del usuario, dando como resultado una mejor correspondencia entre la distribución de la demanda de tráfico y los recursos de la red.

Por ejemplo, en la tecnología 3G se pueden distinguir dos tipos principales de HO (handover, traspaso) (Goes, 2009), entre los cuales están el *soft HO*, que se produce cuando un móvil pasa de una celda a otra utilizando la misma frecuencia. En este proceso

la transmisión se realiza en paralelo evitando la interrupción del enlace. El segundo tipo es el *hard HO*, que ocurre cuando se tiene dos tipos diferentes de red con diferentes frecuencias ya que al momento del traspaso la conexión con la estación base origen se corta antes de establecerse la conexión a la nueva BS.

En el proceso de HO se comprueba únicamente el nivel de SS (Signal Strength, Fuerza de la señal) para realizar el traspaso entre BS, es decir, cuando el nivel de SS supera el umbral mínimo configurado. Sin embargo, el proceso de HO depende de varios factores del sistema, como potencia de transmisión, ganancia de antena, altura de antena, atenuación de la señal en el entorno de propagación, entre otros.

A continuación, se realiza un breve análisis sobre los tipos de HO (Tayyab et al., 2019) y su gestión en tecnologías LTE y 5G.

Handover Inter/intra frecuencia

Una medición intra-frecuencia se basa en la clasificación de celdas con la misma frecuencia portadora, mientras que la inter frecuencia se basa en la clasificación de celdas de otras frecuencias portadoras, entre más frecuencias de medición, mayor es el consumo de energía de la batería del UE, el cual debe realizar estas mediciones en orden de prioridad desde las BS.

Handover de capa intercelular/intracelular

El HO intracelular se basa en la calidad de la señal SS recibida de las celdas que pertenecen a una misma capa. Para optimizar el consumo de energía del UE, se toman mediciones periódicas entre frecuencias en intervalos de medición específicos. Cuando la calidad de una pico-celda se vuelve mejor que un umbral, el UE descarga a la capa de celdas pequeñas, este proceso es denominado HO de macro a pico/intercelular.

Handover Inter/Intra-Rat

El HO horizontal se produce en la misma tecnología de acceso por radio (RAT) y también se denomina HO Intra-Rat. Este proceso ocurre entre varias celdas de la misma red debido a la preservación de la conectividad del UE con la red. El HO vertical también denominado Inter-Rat ocurre cuando la red instruye al UE, de acuerdo con una elección de servicio particular del usuario más que de conectividad.

Handover Inter/Intra operador

El HO Intra-Operador se produce entre tecnologías, redes y sistemas de un mismo operador y el HO inter-operador se produce entre tecnologías, redes y sistemas que no son proporcionados por el mismo operador, como es el caso del roaming que ofrece la posibilidad de que el usuario fuera del alcance de su red doméstica se conecte a otra red disponible.

5.1.2 Margen de histéresis (HOM)

El concepto de HOM se define en (Lal & Panwar, 2008) los autores indican que el margen de histéresis es un parámetro comúnmente utilizado para la eliminación de traspasos redundantes, es decir una diferencia de potencias (dBs) que se emplea para preservar la calidad de la señal recibida por el usuario.

En el algoritmo de traspaso, el margen de histéresis se determina dinámicamente como una función de la distancia entre el dispositivo móvil y la estación base de servicio. Esto significa que el valor del margen de histéresis varía en función de la ubicación del dispositivo móvil, lo que puede reducir la probabilidad de traspasos necesarios y mantener la calidad del servicio. El criterio de rendimiento del traspaso se basa en minimizar tanto el número de traspasos como el retraso promedio de traspaso para los parámetros de propagación y la trayectoria móvil.

En ese sentido mientras se aplica margen de histéresis, el traspaso y la iniciación se basan en la comparación de uno o varios parámetros de señal de una estación base de servicio y una estación base de destino. El traspaso se inicia si el parámetro de señal de la estación base de destino supera el parámetro de la estación base de servicio. Este parámetro junto a otros específicos de la estrategia de traspaso determina en gran medida la tasa de traspasos de la red y la probabilidad de pérdida o caída de la conexión durante este proceso en LTE.

5.1.3 Time to trigger (TTT)

El traspaso entre dos células vecinas se ejecuta cuando se cumplen los criterios de handover durante el periodo de tiempo TTT (Lee et al., 2010), el criterio de handover se cumple cuando la SINR de un equipo de usuario en una celda cercana es mayor que la

SINR en la celda de servicio actual. Este periodo de tiempo TTT evita el desperdicio de eventos handover durante un corto periodo de tiempo. En resumen, un valor TTT es el intervalo de tiempo que se requiere para satisfacer la condición HOM. Tanto HOM como TTT se utilizan para reducir los traspasos innecesarios, lo que se denomina "efecto Ping-Pong". (Iñiguez, 2014)

Este parámetro TTT funciona básicamente como un temporizador empleado junto a margen de histéresis (HOM) de manera que brindan robustez al traspaso dado por los algoritmos, entre el HOM y TTT determinan el resultado de la gestión de movilidad en LTE.

5.2 Tipos de sistemas de balanceo de carga

5.2.1 Sistemas clásicos

5.2.1.1 Optimización de traspasos basado en FLC tipo 2.

Con el objetivo de minimizar el número de traspasos, se utiliza el método de optimización de traspasos basado en FLC de tipo 2 la CDR (call drop rate, tasa de caída de llamadas) y mitigar la sobrecarga de señalización se desarrolla una nueva técnica de optimización de traspasos basada en el controlador de lógica difusa (FLC) de tipo 2, logrando una optimización ideal para garantizar la QoS. Los recursos de espectro disponibles, las cargas de celdas y la movilidad de los usuarios se integran como criterios para el esquema de optimización, mejorando la asignación de usuarios a celdas pequeñas y macro y minimizando el ping-pong de la red.

Los algoritmos de traspaso para una red LTE-A que realizan el traspaso desde la celda origen a la celda destino son: LBHA (LTE-A basic handover algorithm, algoritmo de traspaso básico LTE-A) y LHARC (LTE-A handover algorithm with average RSRP constraint algorithm, Algoritmo de traspaso LTE-A con restricción de potencia recibida de señal de referencia promedio (RSRP)). (Saeed et al., 2018)

El rendimiento de este sistema se calcula sobre la base de CDR, LBI (Load balancing index, Índice de equilibrio de carga) y ANH (Average number of handovers, Número medio de traspasos). Las métricas del rendimiento en el sistema son:

CDR (Call drop rate, tasa de caída de llamadas), se utiliza para cuantificar la experiencia del usuario, indicando la QoS de toda la red.

Li (Cell load, carga de la celda), es la relación entre el número asignado de PRB y el número total de PRB (Physical resource block, bloque de recursos físicos) que pertenecen a la celda.

LBI (Load balancing index, índice de equilibrio de carga), es una métrica que indica la racionalidad de la asignación de recursos del espectro, a través del cálculo de la carga en cada celda y el LBI de la red general para reflejar la distribución de carga.

En el sistema FLC tipo 2 se utilizan dos entradas y dos salidas que optimizan el problema de transferencia de LTE-A, las entradas son CDR y LBI y las salidas son HOMmacro y HOMpequeño. La optimización de HOMmacro y HOMpequeño se implementó de acuerdo con el CDR que determina el incremento o decremento de los parámetros de traspaso, mientras que el LBI selecciona que parámetro debe organizarse, logrando así una QoS satisfactoria en el sistema considerando la movilidad y velocidad de los usuarios.

5.2.1.2 Mejora de traspasos a través de coordinación de interferencia entre celdas

ICIC (Inter Cell Interferences Coordination, coordinación de interferencia entre celdas) es una técnica propuesta en (Aziz & Sigle, 2009) para superar los problemas de ICI (Inter Cell Interference, interferencia intercelular) en sistemas LTE. En un sistema LTE, la interferencia intercelular es crítica en los bordes de las celdas y puede afectar el rendimiento del traspaso.

La ICIC es una técnica que limita el uso de los recursos del sistema de alguna manera para coordinar la interferencia y mejorar el rendimiento del traspaso. En este estudio, se empleó un esquema estático para ICIC que también se conoce como reutilización fraccional de frecuencia.

La FFR (Fractional Frequency Reuse, reutilización de frecuencia fraccional) es un esquema estático para la coordinación de interferencia entre celdas (ICIC) en sistemas LTE. FFR divide la banda de frecuencia en subconjuntos y cada celda de la red transmite al menos un subconjunto con potencia reducida. El subconjunto con potencia de transmisión reducida se configura de acuerdo con un patrón de reutilización en la red. El conocimiento del subconjunto con potencia reducida de la celda y sus vecinos proporciona la base para la coordinación de la interferencia. La ganancia óptima del esquema se logra cuando el algoritmo de programación sirve al UE en los límites de la

celda con el subconjunto de frecuencias que se usa con potencia reducida en la celda vecina. FFR busca limitar el uso de los recursos disponibles del sistema.

La interferencia entre celdas (ICI) en los sistemas LTE puede tener un impacto significativo en el rendimiento de la transferencia, especialmente en los bordes de las celdas. Esto se debe a que los sistemas LTE utilizan un sistema de reutilización de frecuencia, que maximiza el uso de los recursos de frecuencia, pero también genera problemas de ICI. ICI puede minimizar el rendimiento del borde celular y afectar el rendimiento del traspaso en LTE. El traspaso está estandarizado para los sistemas LTE que utilizan filtros L3 (European Patent Office, 2016), histéresis y mecanismos de tiempo de activación, pero el UE necesita recibir un mensaje de comando de traspaso sin errores para un traspaso exitoso. Esto se vuelve crítico cuando existe una alta interferencia en los bordes de las celdas. La coordinación de interferencia entre células (ICIC) es una técnica que se ha propuesto para superar los problemas de ICI y mejorar el rendimiento de la transferencia.

5.2.2 Sistemas modernos

5.2.2.1 Big Data para la gestión del handover vertical

El método de traspaso vertical en redes heterogéneas tiene por objetivo elegir una solución de red óptima para solventar el rápido crecimiento del volumen de tráfico de clientes en las redes móviles. Este algoritmo utiliza la tecnología de BD (Big Data) (Beshley et al., 2021), empleando los datos de los usuarios y de red de manera que mediante su distribución y uso de información inteligente y analítica se pueda proporcionar el nivel necesario de calidad de servicio.

Esta técnica consta de 4 etapas para el proceso de optimización y equilibrio de carga en redes heterogéneas.

La primera etapa es la recopilación de big data a través del UE, RAN (radio Access network, red de acceso por radio), y los ISP (Internet Service Providers, Proveedores de servicios de internet). En una red heterogénea los MNO (Mobile Networks Operators, Operadores de redes móviles) manejan una gran cantidad de datos relacionados con los servicios de los usuarios en la red. En (Martinez-Mosquera et al., 2020) se detalla un principio de recopilación de datos de los elementos de una red a un sistema centralizado para la gestión del rendimiento en redes móviles.

La segunda etapa es un análisis de los datos recopilados, el procesamiento y depuración de la información, para lo cual se necesita una tecnología para transformarlos y optimizar la red. Luego se implementan medidas basadas en los resultados de BD a nivel de usuario de manera que éstos se clasifiquen en función de la clase de servicio para quienes están en la misma celda, lo que a su vez permite predecir las fluctuaciones de tráfico y mejorar la QoE.

La tercera etapa es la gestión de los recursos del operador de la red de acceso radioeléctrico. El uso de análisis de BD resuelve estrategias de asignación de recursos que solventan los requisitos de tráfico en un área de cobertura. El análisis de red implica monitorear y analizar estadísticas de usuarios que permiten la predicción en tiempo real de puntos críticos y el estado de las redes móviles. Con base en los datos obtenidos, se toman decisiones para atender a los usuarios equilibrando la carga y priorizando el tráfico para mejorar la eficiencia de la operación en una red heterogénea.

Finalmente, en la cuarta etapa se incluye el proceso de iniciación de traspaso vertical, redistribución de flujos y el rechazo de usuarios no prioritarios.

5.2.2.2 Mecanismo de traspaso basado en la movilidad del usuario para mitigar efecto ping-pong

El mecanismo de traspaso permite que un usuario en movimiento se traslade a otra celda sin interrupción de conectividad, sin embargo, se presentan situaciones en las que ocurre una serie de trasposos durante un periodo de tiempo corto, lo cual es conocido como efecto ping-pong y afecta el rendimiento de la red, debido a la alteración que provoca en la comunicación de los usuarios en movimiento. Para evitar el efecto ping-pong se considera la predicción de la movilidad del usuario y la ejecución de un procedimiento de traspaso en el momento adecuado en función de la movilidad estimada, para de esta manera garantizar la QoS y la comunicación fluida.

La capacidad del canal para un dispositivo se determina por su RSS (Received signal strength, Intensidad de señal recibida), la cual depende de la distancia entre el dispositivo y su BS, por ende, el método propuesto en este artículo (Gu et al., 2010) estima la velocidad radial de un dispositivo móvil hacia estaciones base vecinas utilizando RSS y propone un mecanismo eficiente de decisión de traspaso basado en la movilidad directa e indirecta para reducir la demora durante el proceso de transferencia.

La estimación de movilidad directa utiliza un sistema de posicionamiento global incorporado para estimar la movilidad de un dispositivo, lo que puede aumentar el costo de los dispositivos móviles y no operar en ambientes interiores. Por otro lado, la estimación de movilidad considera información indirecta sobre la movilidad de los dispositivos, como RSS y SINR, lo que es más atractivo y práctico que el método de estimación de movilidad directa.

La velocidad radial de un dispositivo móvil hacia las estaciones base vecinas, se calcula utilizando la medición de RSS y la distancia entre el dispositivo móvil y la estación base. El algoritmo utiliza RSS acumulativos promedio para estimar la movilidad de los dispositivos móviles, por otro lado, este mecanismo también puede predecir la variación de la calidad de canal a largo plazo. La precisión de este mecanismo es alta para los dispositivos móviles que se mueven a baja velocidad.

5.2.2.3 Técnicas de aprendizaje máquina aplicado a sistemas de balanceo de carga.

Las redes heterogéneas son esenciales para la alta capacidad de red y la reutilización de alto espectro que satisfaga las demandas de tráfico en la tecnología 5G. Para garantizar su eficiencia y buen funcionamiento se debe optimizar los procesos de traspaso de manera que exista una movilidad fluida.

Para minimizar los traspasos no deseados en redes dinámicas de celdas pequeñas el autor (Nguyen & Kwon, 2021) propone el algoritmo MRO (Mobility Robustness Optimization, Optimización de robustez de movilidad) utilizando aprendizaje automático, el cual tiene por objetivo minimizar las fallas de traspaso debido a RLF (Radio link failures, Fallas de enlace de radio) y evitar en lo posible el efecto ping-pong, ya que estos dos parámetros juntos inducen señalización que consume varios recursos en poco tiempo.

Este algoritmo consta de dos pasos: Adaptación de topología en cSON (Centralized Self organizing network, Red autoorganizada centralizada) que está ubicado en la administración de la red para la organización de la misma y adaptación de movilidad en dSONs (Decentralized Self organizing network, Red auto organizada descentralizada), que están implementadas en las celdas pequeñas para la adaptación local.

El cSON obtiene un conocimiento previo de las tareas de optimización y lo envía a los dSON para acelerar la convergencia de los procesos de aprendizaje y ajustar los parámetros de traspaso de manera que puedan adaptarse a los entornos móviles.

A. TRANSFERENCIA DE APRENDIZAJE-TOPOLOGIA DE RED DINAMICA BASADO EN UN ALGORITMO DE ADAPTACION

Este algoritmo está basado en aprendizaje de transferencia para adaptarse a topologías de red dinámicas y es el encargado de recopilar el conocimiento previo de las tareas de optimización, que incluye una estimación o distribución conocida de los parámetros de transferencia óptimos para adaptarse a una topología variable.

B. ALGORITMO DE ADAPTACIÓN A LA MOVILIDAD BASADO EN EL APRENDIZAJE POR REFUERZO DISTRIBUIDO

Se basa en aprendizaje de refuerzo distribuido para adaptarse a la movilidad de UE variable en el tiempo mediante la optimización de los parámetros de transferencia. Para adaptarse a la movilidad del usuario, en cada celda de una subtopología particular, el algoritmo de adaptación de movilidad utiliza el conocimiento previo para optimizar tres parámetros de traspaso (TTT, histéresis y CIO).

5.2.3 Sistemas híbridos

5.2.3.1 Método E-MOORA

El método E-MOORA (Palas et al., 2021) es una combinación de la técnica de ponderación de entropía modificada y el método de optimización multi-objetivo mediante el análisis de relación MOORA y está basado en el enfoque Q-learning para optimizar el traspaso y seleccionar los puntos de activación óptimos que minimizan el efecto de transferencias innecesarias frecuentes para satisfacer los requisitos de QoE (Quality of Experience, calidad de servicio) del usuario.

Este método clasifica a las celdas destino en función de múltiples métricas de traspaso como retraso, SINR, CLC (Current Load on Cell, carga actual en la celda), UTP (User Transmitted Power, potencia transmitida por el usuario) y UMP (User Movement Probability, probabilidad de movimiento del usuario), las cuales se describen brevemente a continuación:

-El *retraso* es un parámetro de QoE, que brinda al usuario la obtención de servicios en tiempo real en una red celular inalámbrica e indica la cantidad de tiempo que se necesita para transmitir un paquete desde el UE (User Equipment, equipo de usuario) de origen hasta el UE de destino.

-En este sistema *SINR* es la medida de la calidad de señal que indica la fuerza de la señal recibida en comparación con la interferencia y el ruido; Ayuda a seleccionar la celda con el SINR más alto reduciendo el efecto ping-pong y los traspasos innecesarios.

-*CLC* es la métrica usada para conocer la cantidad de bloques de recursos (unidad más pequeña de ancho de banda) que pueden obtenerse en una celda y su función es limitar el número máximo de traspasos logrando mejorar la QoE.

-*UTP* es una métrica que mide la cantidad de energía que se necesita para la transmisión de flujo de datos, y su función es evitar que el usuario móvil entregue una celda que requiere más energía para transmitir los datos, consiguiendo una mejora en la eficiencia energética del usuario.

-*UMP* es un parámetro QoE de transferencia para predecir la celda de destino óptima, reduciendo la posibilidad de caída de llamadas y la latencia en la red. Bajo un modelo de almacenamiento y predicción de datos sobre el movimiento del usuario con información contextual y ubicaciones visitadas con frecuencia, se extraen los datos y se asigna la celda de destino mediante el método MOORA.

Este algoritmo adopta la normalización vectorial para normalizar las métricas de transferencia reduciendo la inconsistencia en la clasificación de celdas y por ende lograr la identificación óptima de la celda destino, para mejorar el rendimiento del usuario. Además, también mejora la eficiencia energética del usuario aprovechando la potencia que transmite al clasificar la celda destino.

Después de seleccionar la celda óptima para el traspaso, los puntos de activación apropiados, como el tiempo de activación (TTT) y la histéresis (Hys), se actualizan utilizando el enfoque de Q-learning, el cual evita los traspasos demasiado tempranos y demasiado tarde, por lo cual minimiza la cantidad de fallas en los enlaces.

5.2.3.2 *Traspaso multicriterio mediante métodos TOPSIS ponderados*

El despliegue de celdas pequeñas ultra-densas en redes 5g puede provocar un gran número de traspasos y por lo tanto una sobrecarga de señalización. Para garantizar la continuidad del servicio como respuesta a la alta demanda de tráfico de datos, en (Alhabet & Zhang, 2018) se modela la decisión de traspaso con base en el método de toma de decisiones de atributos múltiples, concretamente TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, Técnica para la preferencia de orden por similitud con la solución ideal).

TOPSIS es una técnica de toma de decisiones de múltiples criterios que se utiliza para seleccionar la mejor opción entre varias alternativas. En el contexto de las redes heterogéneas, se puede utilizar TOPSIS para tomar decisiones de traspaso de manera eficiente y efectiva. Se utiliza para modelar el problema de decisión de traspaso basado en múltiples atributos, como la calidad de la señal, la velocidad de la red y la capacidad de la red. Los puntos de acceso se consideran como alternativas y los atributos de traspaso se consideran como criterios para seleccionar el punto de acceso adecuado para el traspaso.

Además, existen variantes de TOPSIS que utilizan técnicas de ponderación de atributos, como la ponderación de entropía y la ponderación de desviación estándar, para asignar pesos a los atributos de traspaso y mejorar la precisión de la toma de decisiones.

El autor propone dos métodos modificados de TOPSIS para la gestión de traspasos en redes heterogéneas. El primer método se denomina PE-TOPSIS que incorpora la técnica de ponderación de entropía para la ponderación de las métricas de traspaso. El segundo método PSD-TOPSIS, utiliza una técnica de ponderación de desviación estándar para evaluar la importancia de cada método de traspaso. El rendimiento de los métodos PE-TOPSIS y PSD-TOPSIS se evalúa en términos de número de traspasos, falla del enlace de radio y rendimiento medio del usuario (Throughput).

Los métodos propuestos de TOPSIS utilizan técnicas de ponderación de atributos MADM (Multiple Attribute Decision Making, toma de decisiones de múltiples atributos) para seleccionar la estación base adecuada para el traspaso. Esto ayuda a reducir el número de traspasos necesarios y fallas en los enlaces de radio al seleccionar la estación base adecuada para el traspaso. Además, también utiliza la velocidad del usuario, la relación señal-ruido y el ángulo de movimiento del usuario como atributos para la toma

de decisiones de traspaso, lo que mejora aún más la precisión de la selección de la estación base adecuada.

5.2.4 Análisis comparativo

En la Fuente: se encuentran los parámetros de configuración del escenario de prueba de una macro-célula urbana 5G, que se usará luego de un análisis comparativo entre las técnicas de sistema de balanceo de carga ya descritas para definir que método es el más apropiado acorde al escenario propuesto.

Este escenario de prueba está elaborado de la siguiente manera:

Cellular Layout (Distribución de las celdas): Las redes 5G reutilizan el diseño de red de la tecnología 4G. Para brindar una conexión continua se distribuyen celdas agrupadas en racimos, que cubren un área delimitada, dependiendo del lugar en que los usuarios requieran de conexión. En la caracterización del escenario propuesto, esta distribución consta de 57 celdas hexagonales en total, es decir 3 celdas sectorizadas, correspondientes a la red hexagonal de 19 BS. El ISD (Inter-side distance, distancia entre sitios) es de 500m.

Total Users (Número de usuarios totales): Se tienen 1980 usuarios concentrados en un área de 2000x2000 dentro de un estadio de fútbol. Los usuarios que se encuentran dentro del lugar son 900 y los usuarios que se encuentran de forma aleatoria por los alrededores del estadio son 1080.

Cellular Area (Área de las celdas): El usuario debe encontrarse dentro del área de alcance de la antena para no perder conexión, es por esto que se despliegan varias celdas equipadas con estaciones base para asegurarse que no queden vacíos entre ellas y no se pierda la localización de los usuarios. El área de las celdas en este escenario es de 4km^2

Transmission direction (Dirección de transmisión): Es la transferencia de datos entre dos dispositivos a través de un canal de comunicación, en el escenario propuesto se utiliza el modo de transmisión simplex, es decir solo existe enlace descendente *Downlink*.

Carrier frequency (Frecuencia portadora): La frecuencia (número de ondas por segundo) de una onda portadora (onda que transporta una señal para transmitir información) se mide en Hz. La frecuencia portadora en el escenario propuesto es de 4 GHz.

System bandwidth (Ancho de banda del sistema): El ancho de banda del sistema es el rango de frecuencias que un sistema puede transportar a través de un sistema de comunicación en un periodo de tiempo determinado es decir la diferencia entre las frecuencias máxima y mínima del sistema. El ancho de banda en este escenario es de 20MHz.

Frequency reuse (Reúso de frecuencia): Este concepto de reutilización de frecuencia permite que un sistema celular maneje una gran cantidad de llamadas con un número limitado de canales. Es la capacidad de usar las mismas frecuencias repetidamente. Como cada celda usa frecuencias de radio solo dentro de sus límites, las mismas frecuencias se pueden reutilizar en otras celdas no muy lejanas con una posibilidad limitada de interferencia. El sistema propuesto posee un factor de reutilización de 1, es decir cada celda usa la misma frecuencia y los diferentes sistemas están separados por códigos en lugar de frecuencias.

Propagation model (Modelo de propagación): Este concepto es una caracterización de la propagación de ondas de radio en función de la frecuencia, la distancia y otras condiciones. El modelo de propagación utilizado en este escenario es la distribución de desvanecimiento de sombras que provoca fluctuaciones aleatorias a gran escala de la envolvente de la señal debido a objetos grandes (con respecto a la longitud de onda) que obstruyen las rutas de propagación entre el transmisor y el receptor. Utiliza una distribución de una función logarítmica normal.

Channel model (Modelo de canal): El canal de un sistema es la ruta entre el transmisor y el receptor. El modelo de canal describe el comportamiento, prueba y verificación de la transmisión y recepción de radio de UE y eNodeB. La configuración de modelo de canal que se utiliza en este escenario es Multipath fading (Desvanecimiento por trayectos múltiples), el cual ocurre cuando la señal llega al receptor desde varios trayectos. Asimismo, utiliza un modelo extendido para peatones, Extended Pedestrian A model (EPA), que representa un entorno de dispersión de retardo bajo.

Mobility model (Modelo de movilidad): Un modelo de movilidad se utiliza para caracterizar el movimiento del usuario móvil en relación a su ubicación, velocidad y dirección durante un periodo de tiempo ya que la intensidad de la señal depende de la posición y orientación de los nodos. En este escenario, los usuarios se mueven a una velocidad constante de 3 km/h del punto de referencia donde se encuentran concentrados.

Service model (Modelo de servicio): El tipo de modelo de servicio es Data traffic (Tráfico de datos) ya que mediante este modelo se representa la demanda de los usuarios ante el desempeño y control de la red haciendo un uso predictivo para brindar un control oportuno en la funcionalidad y nivel de desempeño que se quiera lograr.

Base station model (Modelo de estación base): La estación base es el punto principal de conexión para establecer la comunicación, el modelo propuesto en este escenario es una antena trisectorial con un sistema MIMO de 8x8 y una potencia de transmisión de 47 dBm.

Scheduler (Planificador): El algoritmo de programación que se utiliza en este escenario es el Round Robin donde los procesos se ejecutan por turnos, uno tras otro en una secuencia repetitiva, y cada uno se adelanta cuando ha agotado su intervalo de tiempo, es decir la tarea se coloca al final de la cola y la nueva tarea se toma del principio de la cola.

RRM features (Radio Resource Management): La gestión de recursos de radio RRM es una técnica que consiste en compartir el escaso espectro entre los usuarios y gestionar las interferencias, los recursos radio y otras características de transmisión en un sistema.

La configuración de Radio Distance para RRM propuesta en este escenario se define en (Torres et al., 2021) y representa la distancia entre la posición del lugar donde se va a realizar un evento social y una celda cercana para comparar la cobertura en función de la potencia de transmisión y equilibrar el valor resultante. También incluye una configuración adicional mediante el uso de márgenes de traspaso para el balance de carga del sistema.

HO parameter settings (Configuración del parámetro de Handover): El margen de traspaso es el umbral hasta el cual se tolera la diferencia entre dos intensidades de señal y por el cual se inicia el traspaso, en el escenario propuesto es de 5 dB.

Tabla 1

Parámetros de configuración escenario de prueba.

PARAMETERS	CONFIGURATION
Cellular layout	Hexagonal grid, 57 cells (3x19 sites) ISD = 0,5 Km
Total Users	1980 (area = 2000 x 2000), Venue User = 900, Random Users = 1080
Cellular area	4 Km ² (2000 x 2000)
Transmission direction	DL
Carrier frequency	4 GHz
System bandwidth	20 MHz
Frequency reuse	1
Propagation model	Shadow fading distribution: log-normal
Channel model	Multipath fading, EPA model
Mobility model	Waypoint, constant speed = 3 Km/h
Service model	Data traffic
Base station model	Tri-sectorized antenna, MIMO 8x8, EIRP _{max} =47 dBm
Scheduler	Round Robin - Best Channel
RRM features	Radio Distance (venue-cells), HO margin
HO parameter settings	HO margin = 5 dB

Fuente: (ITU-R, 2009)(Sun et al., 2016) (Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020, n.d.) (Torres et al., 2021)

6. Resultados

Se realizó un análisis comparativo a partir de metodología cualitativa como se ha mencionado en la sección anterior; y a partir de esto, usando los datos obtenidos, se aplicó la metodología cuantitativa que nos permitió evaluar las técnicas de balanceo de carga y qué tan adaptable podría ser al escenario de prueba propuesto, donde se evalúan los parámetros más importantes de un sistema. De esta forma, se asignaron ponderaciones a las técnicas propuestas para seleccionar la mejor puntuada.

En la Fuente: Se describe brevemente las características principales de cada algoritmo de balanceo de carga.

Tabla 2

Caracterización de los sistemas de balanceo de carga

ALGORITMOS DE BALANCEO DE CARGA	URBAN MACRO ESCENARIO DE 57 CELDAS
Optimización de trasposos basado en FLC tipo 2.	<ul style="list-style-type: none">- Este algoritmo utiliza una técnica FLS (Fuzzy Logic System, Sistema de lógica difusa) de tipo 2. Las dos entradas del sistema son CDR y LBI y las dos salidas son HOMmacro y HOMpequeño.- En general, la FLS tipo 2 se utiliza para mejorar la precisión y la robustez de los sistemas de lógica difusa en situaciones donde los datos son inciertos o ambiguos.- Se utiliza para optimizar el proceso de traspaso en una red, seleccionando los márgenes de traspaso óptimos para las células macro y pequeñas, con el objetivo de minimizar la tasa de caída de llamadas y el número de trasposos. Se utiliza un sistema de inferencia difusa basado en reglas y se aplica

	<p>funciones de membresía inciertas para manejar la incertidumbre en los datos de entrada.</p>
<p>Mejora de traspasos a través de coordinación de interferencia entre celdas</p>	<ul style="list-style-type: none">- La ICI es alta en las fronteras de las celdas y puede afectar el rendimiento del traspaso. El traspaso abrupto se estandariza para los sistemas LTE utilizando mecanismos de filtro L3, histéresis y tiempo de activación. Para un traspaso exitoso, el UE necesita recibir un mensaje de comando de traspaso sin errores. Esto se vuelve crítico cuando hay una alta interferencia presente en las fronteras de las celdas. La ICIC limita el uso de los recursos del sistema de alguna manera para aumentar la ICI y mejorar el rendimiento del traspaso.- En esta técnica se puede usar FFR para mitigar la interferencia entre celdas (ICI) mediante la reutilización de la banda de frecuencia de una manera que limite la interferencia entre celdas. Al reducir la potencia de ciertos subconjuntos en cada celda, las celdas vecinas pueden usar esos subconjuntos sin causar una interferencia significativa. Esto permite un uso más eficiente de los recursos de frecuencia disponibles, al tiempo que minimiza el impacto de ICI en el rendimiento del sistema.
<p>Big Data para la gestión del handover vertical</p>	<ul style="list-style-type: none">- Los datos recopilados están muy relacionados con el perfil y el comportamiento del usuario, incluida su ubicación, movilidad y datos personales sobre las necesidades de QoS/QoE del usuario.- La aplicación de esta técnica se divide en cuatro etapas. La primera etapa es la recopilación de big data a través del UE, la red de acceso por radio (RAN) y los proveedores de servicios de Internet (ISP). La segunda etapa es analizar los datos recopilados. La tercera etapa es la gestión de los

	<p>recursos del operador de la red de acceso radio y en la cuarta etapa se aplica un método integral que incluye el procedimiento de iniciación de traspaso vertical, redistribución de flujos y rechazo de sesiones de usuarios no prioritarios.</p>
<p>Mecanismo de traspaso basado en la movilidad del usuario para mitigar efecto ping-pong</p>	<ul style="list-style-type: none">- El algoritmo propone un mecanismo de decisión de traspaso basado en la movilidad para evitar el efecto ping-pong. Este método estima la velocidad radial de un dispositivo móvil dirigido hacia las estaciones base vecinas en función de la intensidad de la señal recibida.- Se utiliza la fuerza de la señal recibida RSS para estimar la velocidad radial del dispositivo móvil y se usa esta información para tomar decisiones de traspaso más precisas y reducir el efecto ping-pong.
<p>Técnicas de aprendizaje máquina aplicado a sistemas de balanceo de carga.</p>	<ul style="list-style-type: none">-Esta técnica tiene por objetivo reducir el tiempo de adaptación y mejorar la tasa de satisfacción del usuario.- El algoritmo optimiza tres parámetros de traspaso (TTT, histéresis y CIO) juntos en cada celda y consta de dos pasos: adaptación de topología y adaptación de movilidad. En el primer paso, se utiliza un algoritmo de transferencia de aprendizaje para obtener conocimiento previo sobre la optimización de los parámetros de traspaso para la topología de red actual. En el segundo paso, se utiliza un algoritmo de aprendizaje por refuerzo distribuido para ajustar los parámetros de traspaso en función de la movilidad del usuario.
<p>Método E-MOORA</p>	<ul style="list-style-type: none">- Utiliza un análisis de proporción para normalizar los valores de las métricas y calcular un valor de rendimiento para cada celda de destino. La celda con el valor de

	<p>rendimiento más alto se selecciona como la mejor opción para el usuario en movimiento.</p> <p>-El E-MOORA también utiliza un enfoque de aprendizaje por refuerzo llamado Q-learning para establecer los valores óptimos de los parámetros de HO, como el tiempo de activación y la histéresis; lo que a su vez reduce la probabilidad de falla del enlace radio al proporcionar los puntos óptimos de activación de traspaso y reduce el efecto ping-pong de transferencia.</p>
Traspaso multi-criterio mediante métodos TOPSIS ponderados	<p>- Los métodos propuestos explotan el principio TOP-SIS de clasificar las celdas candidatas a HO en función de sus atributos y los pesos de cada atributo. La celda de destino HO final se selecciona cuando está cerca de la solución ideal positiva y lejos de la solución ideal negativa.</p> <p>- Los métodos TOPSIS modificados propuestos, PE-TOPSIS y PSD-TOPSIS reducen la cantidad de traspasos frecuentes y aumentan el rendimiento del usuario promedio. PE-TOPSIS utiliza la técnica de ponderación de entropía para asignar pesos a los atributos, mientras que PSD-TOPSIS utiliza la técnica de desviación estándar.</p>

Fuente: Elaborado por autora.

A continuación, en la Tabla 3 se muestran los resultados cuantitativos que permiten concluir con la pregunta de investigación alrededor de cuál es la técnica de alcance de carga que mejor se adapta a este escenario característico.

Los criterios a tomar en cuenta son: el escenario urbano macro planteado en este trabajo el cual es adaptable para todas las técnicas de balanceo de carga, el segundo criterio a considerar es la distribución de usuarios aglomerados en un punto, cuyo parámetro se toma en cuenta en 3 algoritmos, mientras que para los demás algoritmos se considera distribución uniforme de los usuarios, las consideraciones especiales con respecto al modelo de propagación utilizado en este caso es el desvanecimiento por sombra el cual es tomado en cuenta en 3 de los 7 algoritmos de balanceo de carga. El

parámetro de modelo de movilidad cuya velocidad constante es de 3 km/h se considera en todos los algoritmos excepto en el método E-MOORA y en el método TOPSIS. Finalmente, todas las técnicas de balanceo de carga toman en cuenta la configuración de margen de traspaso, cuyo parámetro es fundamental para la correcta ocupación de recursos en la red.

Existen dos métodos que cubren todos los criterios a evaluar, el primero es el mecanismo de traspaso basado en la movilidad del usuario para mitigar efecto ping-pong, el cual determina si se realiza el traspaso o no mediante la estimación de la velocidad radial del dispositivo móvil en función de la intensidad de la señal recibida. Este método es apropiado para el escenario propuesto ya que considera a los dispositivos móviles que se mueven a baja velocidad (aglomeración de usuarios) con lo cual se tiene menos retraso para la decisión de traspaso que cualquier otro mecanismo. Adicional las simulaciones tomadas en cuenta para este mecanismo consideran parámetros similares a los del escenario propuesto en este trabajo.

La segunda técnica que cubre todos los criterios a evaluar es el método de mejora de traspasos a través de ICIC, el cual se utiliza cuando existe una alta interferencia en los bordes de las celdas, sin embargo, se identificó que cualquier esquema ICIC limita el uso de los recursos disponibles del sistema de alguna manera, por lo cual para este método el autor propone investigar más fondo el rendimiento de HO mediante el uso de esquemas ICIC con algoritmos de programación.

Bajo este análisis el método más apropiado y con el que se puede lograr un rendimiento óptimo en la red bajo el escenario propuesto es el mecanismo de traspaso basado en la movilidad del usuario para mitigar efecto ping-pong.

Tabla 3

Resultados comparativos

Técnicas de balanceo de carga	Escenario Urbano Macro	Distribución de usuarios aglomerados	Modelo de propagación	Modelo de movilidad	Margen de traspaso	TOTAL
Optimización de traspasos basado en FLC tipo 2.	1	0	0	1	1	3
Mejora de traspasos a través de coordinación de interferencia entre celdas.	1	1	1	1	1	5
Big Data para la gestión del handover vertical.	1	0	0	1	1	3
Mecanismo de traspaso basado en la movilidad del usuario para mitigar efecto ping-pong	1	1	1	1	1	5
Técnicas de aprendizaje máquina	1	0	0	1	1	3
Método E-MOORA	1	1	1	0	1	4
Traspaso multi-criterio mediante métodos TOPSIS ponderados	1	0	0	0	1	2

Fuente: Elaborado por autora.

7. Discusión

Existen proyectos de investigación que realizan análisis comparativos entre diferentes técnicas de equilibrio de carga como es el caso del trabajo denominado: “Load Balancing Optimization in LTE/LTE-A Cellular Networks” donde los autores hacen un análisis de técnicas de equilibrio clásicas, las cuales fueron diseñadas para redes celulares sin evaluar el requisito de calidad de servicio, por lo tanto, no son aplicables en redes de última generación. Es por esto que en este trabajo se hace énfasis en el equilibrio de carga como principal objetivo de investigación a fin de mantener el funcionamiento de red adecuado para cubrir la experiencia del usuario final.

De acuerdo al análisis realizado acerca de las diferentes técnicas de balanceo de carga, se identificó que actualmente se busca cubrir de manera óptima el criterio de calidad de servicio y experiencia del usuario, característica que se encuentra en todas las técnicas de optimización para redes de última generación.

Por otra parte, también existen limitaciones de acuerdo al escenario propuesto en el trabajo, ya que en este caso se busca una técnica de balanceo de carga que mejor se adapte a la distribución de usuarios aglomerados en un punto en específico, y en la mayoría de técnicas estudiadas se toma en cuenta una distribución uniforme de usuarios.

Finalmente, el criterio de margen de traspaso es un parámetro que todas las técnicas estudiadas consideran debido a la importancia que tiene el cambio y manejo de celdas para un usuario en movimiento, encontrando puntos clave que se deben tener en cuenta para lograr un esquema eficiente y direcciones de investigación para trabajos futuros.

8. Conclusiones

Se recopiló información acerca de las técnicas y algoritmos utilizados para el balanceo de carga en redes móviles, entre enfoques clásicos y técnicas híbridas se realizó un contraste de los diferentes parámetros que son importantes a tomar en cuenta para el equilibrio de carga, entre ellos la potencia de transmisión, la localización del usuario, los criterios de traspaso, tomando en cuenta los diferentes escenarios que se utilizaron para el estudio.

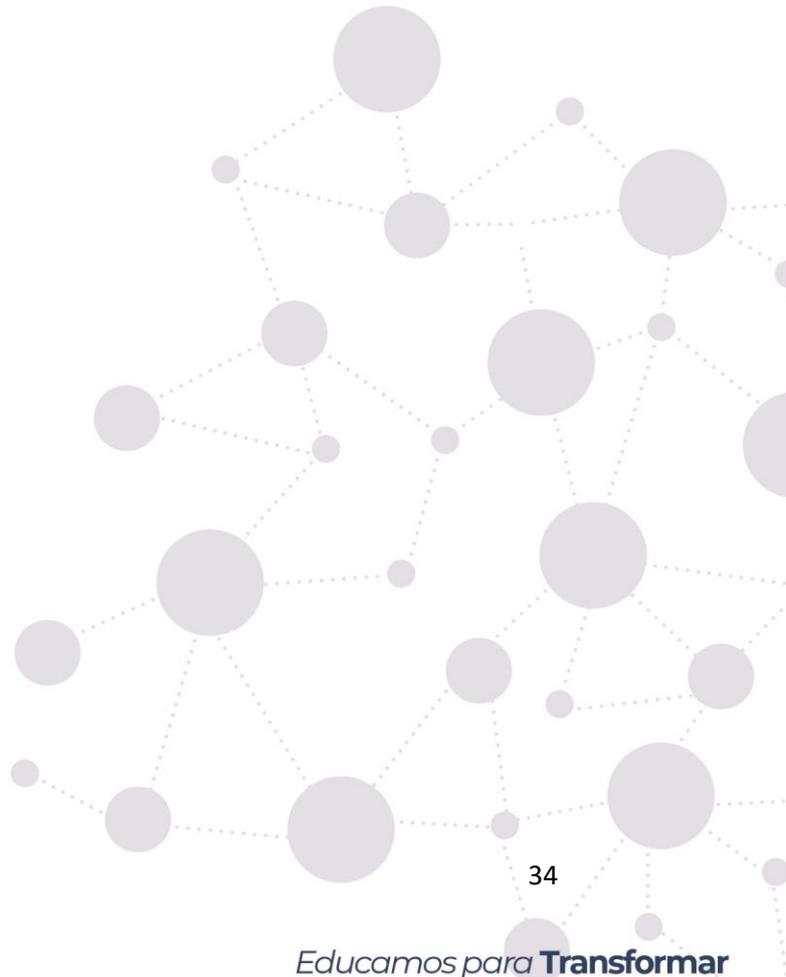
La congestión de usuarios en las redes es un problema que se aborda en varios trabajos de investigación, de acuerdo a la información recopilada se identificó que la optimización de redes mejora la eficiencia y aumenta la calidad de servicio. Para ello se seleccionaron 7 algoritmos para el balanceo de carga en redes móviles donde se identificó las diferencias y características de cada uno de ellos para su posterior análisis de acuerdo al escenario propuesto.

Mediante un análisis cualitativo entre varios algoritmos de balanceo de carga, clásicos, modernos e híbridos y su aplicación y análisis en los distintos parámetros de configuración del escenario propuesto se identificó que la técnica denominada “mecanismo de traspaso basado en la movilidad del usuario para mitigar efecto ping-pong” es la más apropiada, con un valor ponderado de 5 puntos, con los cuales se cubre todos los criterios a evaluar.



9. Recomendaciones

En el presente trabajo se desarrolló y aplicó una metodología de análisis cualitativo y cuantitativo para cubrir los objetivos planteados, para ello nos basamos en revisiones bibliográficas de trabajos similares, sin embargo, para la elaboración de trabajos futuros se recomienda profundizar en los temas analizados y hacer uso de simuladores para la obtención de gráficas reales que comprueben los datos cuantificados en este trabajo.



10. Bibliografía

- Alhabeto, M., & Zhang, L. (2018). Multi-criteria handover using modified weighted TOPSIS methods for heterogeneous networks. *IEEE Access*, 6, 40547–40558. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2846045>
- Alsuhli, G., Ismail, H. A., Alansary, K., Rumman, M., Mohamed, M., & Seddik, K. G. (2021). Deep reinforcement learning-based CIO and energy control for LTE mobility load balancing. *2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2021*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CCNC49032.2021.9369525>
- Aziz, D., & Sigle, R. (2009). Improvement of LTE handover performance through interference coordination. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 4–8. <https://doi.org/10.1109/VETECS.2009.5073597>
- Becvar, Z., & Mach, P. (2010). Adaptive hysteresis margin for handover in femtocell networks. *Proceedings - 6th International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC 2010*, 256–261. <https://doi.org/10.1109/ICWMC.2010.17>
- Beshley, M., Kryvinska, N., Yaremko, O., & Beshley, H. (2021). A self-optimizing technique based on vertical handover for load balancing in heterogeneous wireless networks using big data analytics. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/app11114737>
- Fortes, S., Palacios, D., Serrano, I., & Barco, R. (2018). Applying Social Event Data for the Management of Cellular Networks. *IEEE Communications Magazine*, 56(11), 36–43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700580>
- Goes, A. A. (2009). *Método de handover considerando balanceamento de tráfego para sistemas com modulação adaptativa*.
- Gu, J., Bae, S. J., & Chung, M. Y. (2010). Mobility-Based Handover Decision Mechanism to Relieve Ping-Pong Effect in Cellular Networks. *2010 16th Asia-Pacific Conference on Communications, APCC 2010*, 487–491.
- Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020*. (n.d.). Retrieved June 9, 2023, from <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0057>

- Herrera, E. (2007). Escuela Politecnica Nacional Del Ecuador. In *Optimización del performance de la red GSM de OTECEL (MOVISTAR) a partir del monitoreo y análisis de sus principales indicadores*. (Vol. 201).
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1540/1/CD-0844.pdf>
- Iñiguez, J. (2014). LTE Handover Performance Evaluation Based on Power Budget Handover Algorithm. *Master Thesis ;Universitat Politècnica de Catalunya, February*, 38.
- ITU-R. (2009). *M.2135 Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced* (Vol. 1).
- Lal, S., & Panwar, D. K. (2008). *Coverage Analysis of Handoff Algorithm with Adaptive Hysteresis Margin*. 133–138. <https://doi.org/10.1109/icit.2007.68>
- Lee, Y., Shin, B., Lim, J., & Hong, D. (2010). Effects of time-to-trigger parameter on handover performance in SON-based LTE systems. *2010 16th Asia-Pacific Conference on Communications, APCC 2010*, 492–496.
<https://doi.org/10.1109/APCC.2010.5680001>
- Mishra, S., & Mathur, N. (2014). *Load Balancing Optimization in LTE/LTE-A Cellular Networks: A Review*. <http://arxiv.org/abs/1412.7273>
- Narayanaswamy, S., Kawadia, V., Sreenivas, R. S., & Kumar, P. R. (2002). Power Control in Ad-Hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the {COMPOW} Protocol. *Proc. European Wireless Conference - Next Generation Wireless Networks: Technologies, Protocols, Services and Applications*, 156–162.
- Nguyen, M. T., & Kwon, S. (2021). Machine Learning-Based Mobility Robustness Optimization under Dynamic Cellular Networks. *IEEE Access*, 9, 77830–77844.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3083554>
- Palas, M. R., Islam, M. R., Roy, P., Razzaque, M. A., Alsanad, A., AlQahtani, S. A., & Hassan, M. M. (2021). Multi-criteria handover mobility management in 5G cellular network. *Computer Communications*, 174(March), 81–91.
<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.04.020>
- Piedra, P., & Suarez, A. (2022). Escuela politécnica nacional. *Diseño de Dos Celdas Modelo de Red Celular Para Un Sector de La Ciudad de Quito Con Problemas de*

Interferencia Co-Canal y Congestión Bajo El Estándar IS-95 CDMA., 240.

Ray, R. P., & Tang, L. (2015). Hysteresis Margin and Load Balancing for Handover in Heterogeneous Network. *International Journal of Future Computer and Communication*, 4(4), 231–235. <https://doi.org/10.7763/ijfcc.2015.v4.391>

Saeed, M., Kamal, H., & El-Ghoneimy, M. (2018). Novel type-2 fuzzy logic technique for handover problems in a heterogeneous network. *Engineering Optimization*, 50(9), 1533–1543. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2017.1402012>

Sun, S., Rappaport, T. S., Thomas, T. A., Ghosh, A., Nguyen, H. C., Kovacs, I. Z., Rodriguez, I., Koymen, O., & Partyka, A. (2016). Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(5), 2843–2860. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2543139>

Tayyab, M., Gelabert, X., & Jantti, R. (2019). A Survey on Handover Management: From LTE to NR. *IEEE Access*, 7(1), 118907–118930. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937405>

Torres, R., Fortes, S., Baena, E., & Barco, R. (2021). Social-aware load balancing system for crowds in cellular networks. *IEEE Access*, 9, 107812–107823. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3100459>

Wattenhofer, R., Li, L., Bahl, P., & Wang, Y.-M. (2001). Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society INFOCOM 2001. *Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop Wireless Ad Hoc Networks*, 3, 1388–1397. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=916634>

Zheng, K., Yang, Z., Zhang, K., Chatzimisios, P., Yang, K., & Xiang, W. (2016). Big data-driven optimization for mobile networks toward 5G. *IEEE Network*, 30(1), 44–51. <https://doi.org/10.1109/MNET.2016.7389830>

Zhou, T., Zunxiong, L., Zhao, J., Li, C., & Yang, L. (2018). Joint User Association and User Scheduling for Load Balancing in Heterogeneous Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(5), 3211–3225. <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2808488>

11. Anexos

Anexo 1. Certificado de traducción

CERTIFICATION OF TRANSLATION ACCURACY

An instance of a certificate of translation sample follows.

I, Andres Roberto Baldassari C. declare that I am fluent in the English and Spanish languages, and that the translation of this ABSTRACT, related to KAROL NAYELI QUEZADA RÍOS, the original of which is in the Spanish language, truly reflects the content, meaning and style of the original text and constitutes in every respect a correct and true translation of the original document.

TRANSLATORS QUALIFICATIONS

Universidad Central del Ecuador - Bachelor in Arts in English Teaching.

Pontificia Universidad Católica – Master in Applied Linguistics English – Spanish

Certified Translator – Senescyt register

Universidad Central del Ecuador – Authorized translator

Andres Baldassari C. does not vouch for the authenticity of the aforementioned copy of the document or statements contained therein.

Andres Baldassari C. and his associates are not liable for any action/losses taken by the holder of this translation.

Andrés Baldassari MA.App.Lng
Certified Translator – Senescyt - MDT-3104-CCL-259519
Phone: (593) 098 7030 511
Email: andresbaldassari@hotmail.com



CERTIFICADO DE TRADUCCIÓN

Andrés Baldassari
MA.App.Lng

CERTIFICO:

Haber realizado la traducción de español a inglés del resumen de la tesis titulada: " ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS DE BALANCEO DE CARGA APLICADOS A REDES MÓVILES DE ÚLTIMA GENERACIÓN ", de autoría KAROL NAYELI QUEZADA RÍOS con cédula de identidad Nro. 1104194335, egresada de la facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja, trabajo que se encuentra bajo la dirección del Ing. Renato Torres, Mg. Sc. previo a la obtención del título de Magister en Telecomunicaciones.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al interesado hacer uso del presente en lo que creyere conveniente.

Quito, 11 de julio de 2023



ANDES ROBERTO
BALDASSARI CASQUINTE

Andrés Baldassari MA.App.Lng
Certified Translator – Senescyt - MDT-3104-CCL-259519
Celular: (593) 098 7030 511
Email: andresbaldassari@hotmail.com