



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Evaluación de parámetros de optimización de sistemas de balanceo de carga para redes móviles basado en contexto social

Trabajo de Titulación previo a la
obtención del título de Ingeniera en
Electrónica y Telecomunicaciones.

AUTORA:

Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

DIRECTOR:

Ing. Renato Benjamín Torres Carrión, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2023

Certificación

Loja, 19 de julio de 2023

Ing. Renato Benjamín Torres Carrión

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Evaluación de parámetros de optimización de sistemas de balanceo de carga para redes móviles basado en contexto social**, previo a la obtención del título de **Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones** de la autoría de la estudiante: **Karina Yajaira Martínez Luzuriaga**, con **cédula de identidad Nro. 1104902679**, 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.

Ing. Renato Benjamín Torres Carrión, Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Karina Yajaira Martínez Luzuriaga**, 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 de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula de Identidad: 1104902679

Fecha: 02 de agosto de 2023

Correo electrónico: karina.martinez@unl.edu.ec

Teléfono: 0984906094

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

Yo, **Karina Yajaira Martínez Luzuriaga**, declaro ser autora del Trabajo de Titulación denominado: **Evaluación de parámetros de optimización de sistemas de balanceo de carga para redes móviles basado en contexto social**, como requisito para optar al título de **Ingeniero en Electrónica y 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 dos días del mes de agosto del dos mil veintitrés.

Firma:

Autora: Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

Cédula: 1104902679

Dirección: Loja - Cdla. Sol de los Andes

Correo electrónico: karina.martinez@unl.edu.ec

Teléfono: 0984906094

DATOS COMPLEMENTARIOS:

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

Dedicatoria

A mis padres por haberme convertido en la persona que soy hoy, a ustedes les debo mis logros; sin su apoyo, no podría haberlo logrado. Siempre me encaminaron a salir adelante sin permitirme fallar. A mis hermanas Annaiss y Thalia por creer siempre en mí, brindarme su apoyo incondicional y aconsejarme para mejorar como persona y en mis estudios. Les agradezco por ayudarme a cumplir mis metas en mi proceso de formación profesional.

Gracias, madre y padre, por todo.

Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que han contribuido a la realización de esta investigación titulada "Evaluación de Parámetros de Optimización de Sistemas de Balanceo de Carga para Redes Móviles Basado en Contexto Social".

Además, me gustaría extender mi más sincero agradecimiento a mi supervisor, Renato Torres, por su valiosa orientación, apoyo constante y sugerencias perspicaces durante todo el proceso de investigación. Su experiencia y tutoría han sido fundamentales para dar forma a la dirección y el alcance de esta investigación.

Por último, quisiera agradecer a los docentes de la carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y miembros de la facultad de la Universidad Nacional de Loja por su orientación académica y su apoyo como parte del proyecto de investigación "Sistemas de balanceo de carga para redes móviles de próxima generación basados en el contexto social" identificados y registrados con código único de registro 27-DI-FEIRNNR-2023.

Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas	x
Índice de figuras	x
Índice de anexos	xii
1. Título	1
2. Resumen	2
2.1. Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco Teórico	6
4.1. Sistemas de telefonía celular	6
4.1.1. Primera Generación de Tecnología Móvil: 1G.....	7
4.1.2. Segunda Generación de Tecnología Móvil: 2G.....	8
4.1.3. Tercera Generación de Tecnología Móvil: 3G	8
4.1.4. Cuarta Generación de Tecnología Móvil: 4G.....	8
4.1.5. Quinta Generación de Tecnología Móvil: 5G.....	9
4.1.6. Comparativa de 5G y 4G	10
4.1.7. Aplicaciones de la tecnología 5G	10
4.2. Sistemas de balanceo de carga	11
4.3. Contexto social en redes móviles	12
4.4. Lógica difusa (Aprendizaje semi-automático).....	12
4.4.1. Controlador de lógica difusa de Mamdani.....	13
4.4.2. Controlador de lógica difusa de Sugeno	14
4.5. Machine Learning (Aprendizaje Automático)	15
4.5.1. Supervised Learning (Aprendizaje Supervisado)	15

4.5.2.	Unsupervised Learning (Aprendizaje No Supervisado)	16
4.5.3.	Reinforcement Learning (Aprendizaje por Refuerzo)	16
4.5.4.	Deep Learning (Aprendizaje Profundo).....	16
4.5.5.	Deep Reinforcement Learning (Aprendizaje por Refuerzo Profundo).....	16
4.6.	Parámetros indicadores de rendimiento en redes móviles	17
4.6.1.	RSRP (Reference Signal Received Power).....	17
4.6.2.	RSRQ (Reference Signal Received Quality)	17
4.6.3.	RSSI (Received Signal Strength Indicator)	17
4.6.4.	SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio)	18
4.6.5.	Tasa de transferencia efectiva (Throughput)	18
4.7.	Parámetros de optimización en redes móviles	19
4.7.1.	Margen de Traspaso (HOM).....	19
4.7.2.	Control de potencia (PTS)	19
4.7.3.	Ángulo de inclinación de antenas (TILT).....	19
4.7.4.	Medida de equidad de carga (Load fairness)	20
4.8.	Estado del arte sobre sistemas de balanceo de carga en redes móviles.....	20
4.8.1.	Sistemas de balanceo de carga.....	21
4.8.2.	Contexto social aplicado a balanceo de carga.....	21
4.8.3.	Algoritmos semi-autónomos y autónomos	23
4.8.4.	HOM como medida de balanceo de carga	25
4.8.5.	TILT como medida de balanceo de carga.....	25
5.	Metodología	26
5.1.	Contexto	26
5.2.	Proceso	26
5.3.	Desarrollo.....	28
5.3.1.	Diseño del Sistema de Balanceo de Carga.....	28
5.3.2.	Caracterización del escenario	29
5.3.3.	Escenario de simulación	32
5.3.4.	Parámetros de simulación	33
6.	Resultados	36

6.1. Controlador de lógica difusa basado en handover (<i>HOM</i>) para un escenario con tecnología móvil 4G LTE.....	36
6.1.1. Controlador de lógica difusa de margen de traspaso con variación de [-6, 6] dB ..	37
6.1.2. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para <i>HOM</i> con rango de [-6,6] dB con diferentes configuraciones sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el centro [370,390].....	38
6.1.3. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para <i>HOM</i> con rango de [-6,6] dB con diferentes configuraciones sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el borde [500, 550].....	41
6.1.4. Controlador de lógica difusa de margen de traspaso (<i>HOM</i>) con variación de [-24, 24] dB con cambios normales de [-0.5,0.5] a la salida.....	44
6.1.5. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para <i>HOM</i> con rango de [-24,24] dB con diferentes configuraciones sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el centro [370,390].....	46
6.1.6. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para <i>HOM</i> con rango de [-24,24] dB con diferentes configuraciones sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el borde [500, 550].....	48
6.2. Controlador de lógica difusa basado en el ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base para un escenario con tecnología móvil 4G LTE	51
6.2.1. Controlador de lógica difusa basado la potencia de las antenas de las estaciones base con variación de [-25,5]dB	52
6.2.2. Controlador de lógica difusa basado en el ángulo de inclinación de las antenas ubicadas en las estaciones base con variación de [0, 15]° con cambios normales de [-0.5,0.5] a la salida	53
6.2.3. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para TILT con rango de [0,15]° con diferentes configuraciones	

sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el centro [370,390].....	55
6.2.4. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para TILT con rango de [0,15]° con diferentes configuraciones sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el borde [500, 550].....	58
7. Discusión	62
8. Conclusiones	64
9. Recomendaciones	65
10. Bibliografía	66
11. Anexos	76

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros para escenarios Macro y Micro Urbanos	29
Tabla 2. Patrón de potencia de radiación de un solo elemento de antena.....	30
Tabla 3. Asunciones de simulación para calibración de larga escala	30
Tabla 4. Parámetros de configuración para la simulación de un escenario 4G LTE en Matlab .	32

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama esquemático de un sistema de telefonía celular.....	6
Figura 2. Controlador de lógica difusa de Mamdani	14
Figura 3. Controlador de lógica difusa Sugeno	15
Figura 4. Métricas LTE incluyendo RSRP, RSRQ y SINR.....	18
Figura 5. Sistema de balanceo de carga con parámetros de entrada: desigualdad de carga y HOM	34
Figura 6. Sistema de balanceo de carga con parámetros de entrada: desigualdad de carga, Ptx y TILT	34

Figura 7. Escenarios de simulación para el lugar del evento.....	36
Figura 8. Controlador de lógica difusa Sugeno con 2 parámetros de entrada: Desigualdad de carga y Margen de traspaso o Handover (HOM)	37
Figura 9. Definición de funciones de membresía y variables lingüísticas de las variables del sistema de lógica difusa para HOM.....	37
Figura 10. Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas	38
Figura 11. Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	39
Figura 12. Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	40
Figura 13. Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas	41
Figura 14. Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	42
Figura 15. Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	43
Figura 16. Controlador de lógica difusa Sugeno con 2 parámetros de entrada: Desigualdad de carga y Margen de traspaso o Handover (HOM).....	44
Figura 17. Definición de funciones de membresía y variables lingüísticas de las variables del sistema de lógica difusa para HOM.....	45
Figura 18. Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas	46
Figura 19. Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	47
Figura 20. Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	47
Figura 21. Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas	48
Figura 22. Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	49

Figura 23. Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	50
Figura 24. Controlador de lógica difusa Sugeno con 2 parámetros de entrada: Desigualdad de carga y Potencia de entrada (Ptx).....	52
Figura 25. Definición de funciones de membresía y variables lingüísticas de las variables del sistema de lógica difusa para Ptx.....	52
Figura 26. Controlador de lógica difusa Sugeno con 2 parámetros de entrada: Desigualdad de carga y Ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base (TILT).....	53
Figura 27. Funciones de membresía con variables lingüísticas para expresar la desigualdad de carga (Load_diff).....	54
Figura 28. Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas.....	55
Figura 29. Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	56
Figura 30. Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	57
Figura 31. Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas.....	58
Figura 32. Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	59
Figura 33. Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa.....	60

Índice de anexos

Anexo 1. Certificado de traducción del resumen.....	76
--	----

1. Título

Evaluación de parámetros de optimización de sistemas de balanceo de carga para redes móviles basado en contexto social

2. Resumen

Esta investigación, titulada "Evaluación de Parámetros de Optimización de Sistemas de Balanceo de Carga para Redes Móviles Basado en Contexto Social", tiene como objetivo explorar la efectividad de los sistemas de equilibrio de carga en redes móviles, específicamente en un escenario urbano macro para redes LTE-Advanced. El estudio se llevó a cabo a través de simulaciones utilizando el software MATLAB.

El enfoque principal de la investigación es utilizar lógica difusa con controladores para gestionar diversos parámetros para la optimización del balanceo de carga. Estos parámetros incluyen la desigualdad de carga, margen de traspaso (HOM), potencia de transmisión (Ptx) y el ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base (TILT). El estudio también tiene en cuenta un punto crítico conocido como "venue", que representa un área concurrida y que es la fuente de información social.

Mediante la simulación de diferentes escenarios y la evaluación del rendimiento de los sistemas de balanceo de carga, la investigación busca determinar los parámetros de optimización más efectivos para lograr una distribución equilibrada de los recursos de la red. Las simulaciones en MATLAB proporcionan un entorno realista y controlado para evaluar el impacto de diferentes parámetros en el balanceo de carga.

En general, esta investigación contribuye a la comprensión de los sistemas de balanceo de carga en redes móviles y proporciona ideas sobre la optimización de estos sistemas basados en el contexto social. Los hallazgos tienen el potencial de mejorar la eficiencia y el rendimiento de las redes móviles, mejorando así la experiencia del usuario en áreas densamente pobladas.

Palabras clave: balanceo de carga, lógica difusa, asignación de recursos, conciencia social

2.1. Abstract

This research, entitled "Evaluation of Optimization Parameters of Load Balancing Systems for Mobile Networks Based on Social Context", aims to explore the effectiveness of load balancing systems in mobile networks, specifically in a macro urban scenario for LTE-Advanced networks. The study was conducted through simulations using MATLAB software.

The main focus of the research is to use fuzzy logic with controllers to manage various parameters for load balancing optimization. These parameters include load inequality, handover margin (HOM), transmit power (P_{tx}) and the tilt angle of the base station antennas (TILT). The study also considers a critical point known as "venue", which represents a crowded area and is the social information source.

By simulating different scenarios and evaluating the performance of load balancing systems, the research seeks to determine the most effective optimization parameters to achieve a balanced distribution of network resources. Simulations in MATLAB provide a realistic and controlled environment to evaluate the impact of different parameters on load balancing.

Overall, this research contributes to the understanding of load balancing systems in mobile networks and provides insights into the optimization of these systems based on social context. The findings have the potential to improve the efficiency and performance of mobile networks, thereby improving user experience in densely populated areas.

Keywords: load balancing, fuzzy logic, resource allocation, social-aware

3. Introducción

El aumento del tráfico de datos inalámbricos impulsado por dispositivos de nueva generación ha generado una creciente demanda de capacidad de red. Sin embargo, esta demanda está superando la mejora en la eficiencia del espectro, lo que resulta en puntos de acceso congestionados. El uso generalizado de dispositivos inteligentes y de alta gama ha llevado a un rápido aumento en la demanda de ancho de banda.

Los usuarios móviles y su uso de datos son impredecibles y a menudo desequilibrados, lo que crea una carga desigual en las celdas vecinas, de esta manera, algunas celdas pueden estar sobrecargadas mientras que otras tienen pocos usuarios, lo que desperdicia los recursos disponibles. Dicho desequilibrio de carga afecta negativamente el rendimiento general de la red, dificulta el acceso de nuevos usuarios y reduce la calidad del servicio.

Para abordar este problema, la optimización del balanceo de carga ajusta automáticamente los parámetros de la red para gestionar las condiciones de carga desequilibradas. Esto se logra mediante la detección del desequilibrio de carga y la comparación de la carga de las celdas. La implementación de redes heterogéneas (HetNets) a través de la tecnología LTE ha mejorado la capacidad y la cobertura de la red, pero ha generado nuevos desafíos, como el problema del traspaso entre celdas. La gestión dinámica de la carga se ha vuelto crucial para evitar sobrecargas y daños en los centros de aplicación, así como para mantener el equilibrio en las celdas. En este contexto, el proyecto de titulación: "Evaluación de Parámetros de Optimización de Sistemas de Balanceo de Carga para Redes Móviles Basado en Contexto Social" tiene como objetivo evaluar y optimizar los parámetros de balanceo de carga en redes móviles, especialmente en situaciones de alta carga de red, para lograr un equilibrio más eficiente del número de usuarios por celda.

Para el cumplimiento del objetivo general señalado previamente, se desarrolló el trabajo en función a los siguientes objetivos específicos:

- Definir los parámetros de entrada del sistema de optimización de balanceo de carga basados en un contexto social.
- Seleccionar el sistema de compensación de carga más adecuado basado en sistemas de control.
- Establecer el escenario y los parámetros de simulación en base a la tecnología de red móvil seleccionada.

- Obtener información de mejora de los indicadores de rendimiento basado en gráficas de mérito.

El trabajo de titulación se encontrará centrado en la evaluación de ciertos parámetros de optimización de balanceo de carga en un escenario de red móvil con el fin de mejorar su rendimiento en altas condiciones de carga aplicando un sistema o controlador de lógica difusa. Esencialmente se busca establecer un mecanismo de balanceo de carga optimizado para redes móviles en el contexto social, pues tal mecanismo ayudará a mejorar el rendimiento y a reducir las tarifas de operación en un sistema de redes móviles. Con ayuda del balanceo de carga se puede asegurar que todos los usuarios tengan acceso a puntos específicos de la comunidad de celdas, entonces estos puntos estarán ocupados por un porcentaje proporcional del tráfico inalámbrico lo que se traduce en que ningún único punto de acceso a la red estará sobrecargado. Por lo tanto, se recalca que las redes de optimización automática aumentan el rendimiento y la calidad de experiencia del usuario y, al mismo tiempo, reducen la tasa de trasposos (handover) innecesarios, así que para realizar el proceso de optimización en una red móvil dentro de este proceso de investigación será necesario aplicar algunos algoritmos que ya están diseñados para los sistemas de balanceo de cargas. Estos algoritmos ayudarán a facilitar la evaluación de los parámetros y serán aplicados en un software especializado como MATLAB con el fin de obtener simulaciones que provean información significativa acerca de la mejora de los indicadores de rendimiento para así poder escoger el mejor escenario y la definición de parámetros para un sistema de balanceo de carga para redes móviles basado en contexto social.

El documento se encuentra dividido en algunas secciones como: Marco Teórico y Estado del Arte donde se describen conceptos relacionados a la optimización de sistemas de balanceo de carga a partir de ciertos parámetros de mejora de rendimiento de la red. La sección de Metodología detalla de manera breve el contexto en que se desarrolló el trabajo y su proceso de realización. En la sección de Desarrollo se describe el diseño del sistema de balanceo de carga, así como la caracterización del escenario y los parámetros a ser evaluados dentro de las simulaciones. En cambio, en la sección de Resultados se presentan las gráficas de simulaciones obtenidas a partir de los sistemas de balanceo de carga diseñados a partir de la evaluación de parámetros de optimización de red. Por último, las secciones de Discusión, Conclusiones y Recomendaciones resumen los resultados obtenidos en base al desarrollo del trabajo de investigación, así como también se señala posibles trabajos futuros en base a lo realizado.

4. Marco Teórico

Es fundamental establecer una base teórica concreta respecto al tema de tesis, entonces, en esta sección se detallará en breve conceptos relacionados a las redes y tecnologías móviles, sistemas de balanceo de carga, lógica difusa, parámetros comunes de optimización de sistemas de balanceo de carga e información sobre los indicadores de rendimiento para tecnologías móviles de última generación. Además, la presente sección evidencia un resumen del estado del arte construido con referencia a temas vinculados al trabajo de titulación.

4.1. Sistemas de telefonía celular

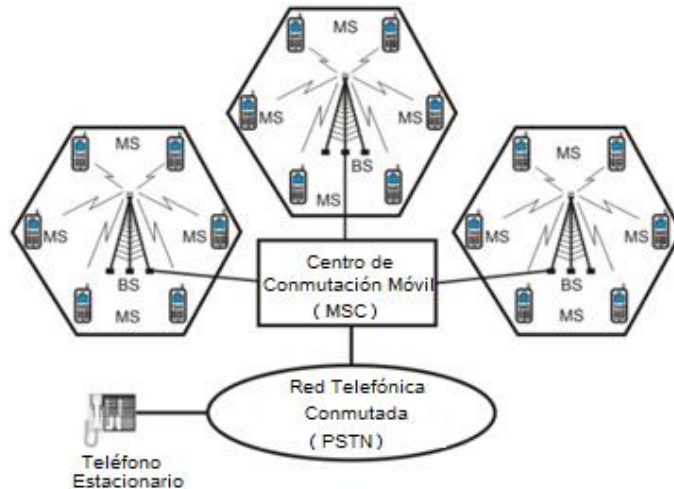
Los sistemas de telefonía celular también llamados como Sistemas Móviles Avanzados (SMA), son extremadamente populares y beneficiosas en todo el mundo pues han despertado mucho optimismo sobre el futuro de las redes inalámbricas. Los sistemas de los teléfonos celulares están diseñados para ofrecer una conversación de voz de dos vías a la velocidad de un automóvil con cobertura cercana o en todo el país. Los sistemas de telefonía celular se diseñaron inicialmente para terminales celulares en el interior de automóviles con antenas instaladas en el techo del automóvil (Walrand & Varaiya, 1999). En 2009, Stallings señaló que un sistema de telefonía celular comprende de manera básica los siguientes elementos:

- Estaciones móviles (MS): teléfonos móviles. Utiliza un consumidor para hablar con cualquier otro consumidor.
- Celda: la ubicación de cada proveedor de telefonía móvil se divide en pequeñas áreas denominadas celdas.
- Estaciones Base (BS): Cada celda incorpora una antena, que es administrada a través de una pequeña oficina.
- Centro de conmutación móvil (MSC): cada estación base se administra a través de una oficina de conmutación, denominada centro de conmutación celular.

Los elementos descritos se encuentran señalados en la **Figura 1**:

Figura 1.

Diagrama esquemático de un sistema de telefonía celular



Nota. Adaptado de *Wireless communications & networks* (p.27), por W. Stallings, 2009, Pearson Education India.

Las redes móviles son redes de comunicación de datos y voz de alta velocidad y capacidad con mayor capacidad multimedia y de roaming (itinerancia) continuo para ayudar a los dispositivos móviles (Vacca, 2014). Como lo señalaron Olsson et al. (2013), las redes móviles, también conocidas como redes celulares, se componen de varias estaciones base, cada una de las cuales proporciona transmisión y recepción inalámbrica de información digital en una o más celdas, donde una celda denota un área particular del área de cobertura de la red; las estaciones base admiten tres celdas durante el despliegue gracias a diseños de antena precisos y planificación de frecuencia. De manera similar, Kawamura et al. (2012) indicaron que una red móvil se encuentra constituida por unidades de equipos de estaciones base de red del mismo tipo que se comunican directamente con terminales de usuario y posee una red central, que consiste en dispositivos de conmutación que configuran canales de comunicación entre dispositivos, así como una red de transmisión. Además, Becvar et al. (2014) manifestaron que, las redes móviles proporcionan conexiones inalámbricas y transmisiones de datos de manera que la red móvil cubre toda su parte central y la infraestructura fija para permitir la entrega de una amplia gama de servicios.

4.1.1. Primera Generación de Tecnología Móvil: 1G

Ud Din Arshad et al. en 2019 manifestaron que, a partir de la década de 1980, se lanzó la tecnología analógica conocida como 1G o primera generación de tecnología móvil con una red de conmutación de circuitos. Se utilizó un método conocido como FDMA con el sistema móvil 1G exclusivamente para operaciones de voz (Acceso Múltiple por División de Frecuencia). Las

frecuencias de operación oscilaron entre 800 y 900 MHz, con una capacidad máxima de canal de 30 KHz. Además, Shukurillaevich et al. (2019) mencionaron que 1G tiene poca capacidad, traspaso errático, mala conectividad de voz y nada de seguridad porque las llamadas de voz se reproducían en las torres de radio, lo que las hacía vulnerables a las escuchas de terceros no invitados. es extremadamente inseguro porque cualquier receptor de radio de banda ancha puede escuchar la conversación. En resumen, tal como lo mencionó Yadav (2017), esta generación estuvo enfocada a la transmisión de voz y no se dio un uso efectivo del espectro provocando que no se pueda realizar el roaming (itinerancia) en las comunicaciones móviles.

4.1.2. Segunda Generación de Tecnología Móvil: 2G

De acuerdo con Goyal et al. (2020), el Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM) y el Acceso Múltiple por División de Código (CDMA) sirvieron como base para la Segunda Generación (2G) que se lanzó en 1991. Como Shukurillaevich et al. (2019) señalaron, 2G tiene una velocidad de 64 kbps y transmite voz a través de señales digitales, además utiliza un ancho de banda de 30 a 200 KHz y ofrece la posibilidad de enviar SMS (Short Message Service). En comparación con 2G, los sistemas 2.5G, como GPRS, CDMA y EDGE, emplean dominios de conmutación de paquetes y conmutación de circuitos y ofrecen velocidades de datos de hasta 144 kbps (Mahmud, 2019).

4.1.3. Tercera Generación de Tecnología Móvil: 3G

Goyal et al. (2020) manifestaron que la tecnología móvil de tercera generación (3G) fue lanzada en el año 2000 con un objetivo, la provisión de datos de alta velocidad. Según Shukurillaevich et al. (2019), en 3G la tecnología de conmutación de paquetes es utilizada para enviar los datos y la conmutación de circuitos se usa para comprender las comunicaciones de voz, también cuenta con un rango de frecuencia de 2100MHz y una capacidad de 15-20MHz para Internet de alta velocidad y videoconferencias como ya se mencionó. En resumen, como lo expresaron Ud Din Arshad et al. (2019), el desarrollo de 3G se caracterizó por su enfoque en mejorar los servicios telefónicos, la velocidad de los datos, la excelente calidad de servicio (QoS) y la seguridad de los datos.

4.1.4. Cuarta Generación de Tecnología Móvil: 4G

Como lo han señalado Ud Din Arshad et al. (2019), con una serie de mejoras importantes con respecto a sus predecesores, la tecnología celular o móvil de cuarta generación (4G) se introdujo en 2010. Acorde a Goyal et al. (2020), 4G ofrece los mismos servicios que 3G además

de otros servicios como multimedia, programas de TV con mayor calidad y transmisión de datos más rápida. De manera similar, Shukurillaevich et al. (2019) mencionaron que, 4G también ofrece servicios adicionales como periódicos multimedia, visualización mejorada de TV y transmisión de datos mucho más rápida que las generaciones anteriores pues las velocidades de descarga de 100 Mbps están disponibles en 4G. Adicionalmente, Mahmud (2019) relacionó el término "tecnología 4G" a LTE (Long Term Evolution) debido a que en su continuo desarrollo se sigue buscando un acceso inalámbrico de banda ancha, servicio de mensajería multimedia (MMS), chat de video, TV móvil, contenido de HDTV, transmisión de video digital (DVB), servicios mínimos como voz y datos, así como otros servicios intensivos en ancho de banda.

4.1.4.1. Tecnología Long Term Evolution (LTE) y Long Term Evolution – Advanced (LTE-A)

Acorde a Noj y Kumar (2022), LTE es una tecnología de comunicación a distancia que fue creada por el 3GPP en la versión 8 con el objetivo de aumentar el límite y la eficiencia espectral de la red celular. Además, la versión 10 del estándar 3GPP desarrollada con muchas mejoras especializadas en comparación con la versión 8, produjo LTE-A. Según mencionaron Fallaha et al. (2019), se requería una velocidad máxima de datos de 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente de LTE, pero en el sistema final el cual ofrece velocidades máximas de datos de 300 Mbps y 75 Mbps, se superó este criterio. En cambio, LTE-Advanced para el enlace descendente y el enlace ascendente, debería ofrecer velocidades máximas de datos de 1000 Mbps y 500 Mbps. Utilizando un ancho de banda total de 100 MHz, que se compone de cinco componentes diferentes con una frecuencia de 20 MHz cada uno, el nuevo sistema se ha configurado para producir velocidades máximas de datos de 3000 y 1500 Mbps. Por último, en el sentido de que un móvil LTE puede comunicarse con una estación base que ejecuta LTE-Advanced y viceversa, LTE Advanced está diseñado para ser compatible con versiones anteriores de LTE.

4.1.5. Quinta Generación de Tecnología Móvil: 5G

La quinta generación de tecnología móvil (5G) es una nueva generación de comunicaciones de alta velocidad y baja latencia que brinda un rendimiento, seguridad, calidad de datos y eficiencia más deseables. Los requisitos y la tecnología en los que se basa principalmente 5G, y las ofertas comerciales de 5G proporcionadas por los operadores móviles, están asociados, pero son independientes (Kharchenko & Zhizhin, 2020). Mahmud en 2019 manifestó que, a diferencia de 4G, que se basa en torres de telefonía celular grandes y poderosas para enviar información más

lejos, las señales inalámbricas de 5G son enviadas a través de muchas estaciones de telefonía celular pequeñas ubicadas en cosas como postes de luz y techos de edificios, además, debido a que el espectro de ondas milimétricas, el rango de espectro entre 30 GHz y 300 GHz en el que se basa 5G para producir velocidades rápidas, solo puede viajar en distancias cortas y es susceptible a la interferencia del clima y los impedimentos físicos, incluidos los edificios, el uso de muchos pequeños se requieren celdas.

4.1.6. Comparativa de 5G y 4G

Las redes inalámbricas hasta 4G se centraron en la disponibilidad de ancho de banda sin procesar, mientras que 5G tiene como objetivo proporcionar conectividad generalizada para sentar las bases para un acceso rápido y resistente a los usuarios de Internet, ya sea que se encuentren en la parte superior de un rascacielos o debajo de una estación de metro (Gopal & Kuppusamy, 2015). En otras palabras, como Hodara & Skaljo (2021) manifestaron, la arquitectura de red 5G es significativamente diferente del diseño 4G en la introducción de computación distribuida, donde los servidores principales están ubicados a cientos o miles de kilómetros de la red celular en la "nube" y se complementan con un clúster más pequeño de servidores en la "Edge Network" o "Red de Borde", que es una red de servidores que está cerca de la red por lo que reduce la latencia, un factor crucial en IoT (Internet de las cosas), donde se realizan las conexiones entre varios objetos y humanos.

Además, como mencionó Gopal & Kuppusamy (2015), 5G estará diseñado para soportar una variedad de aplicaciones como IoT, dispositivos portátiles conectados, realidad aumentada y juegos inmersivos pues ofrece la capacidad de manejar una gran cantidad de dispositivos conectados y una gran variedad de tipos de tráfico. Por último, 5G encabeza el uso de técnicas de radio cognitivas para permitir que la infraestructura decida automáticamente sobre el tipo de canal a ofrecer, diferencie entre objetos móviles y fijos, y se adapte a las condiciones en un momento dado.

4.1.7. Aplicaciones de la tecnología 5G

Los avances en las redes móviles han creado una gran variedad de aplicaciones para mejorar la calidad de vida de los usuarios finales, incluida la movilidad inteligente, el comercio digital, las redes sociales y la atención médica. Para Ding & Janssen (2018), desde una perspectiva más amplia, las aplicaciones móviles forman parte de los servicios de Internet, que han experimentado

una rápida evolución en las últimas décadas, a continuación, se mencionará algunas para la tecnología 5G:

- *Movilidad inteligente:* Admite conectividad generalizada, baja latencia, alta velocidad y confiabilidad de enlaces, seguridad y bajo consumo de energía.
- *Energía inteligente:* Incluye monitoreo y administración de plantas de energía, redes de redes inteligentes, detección y respuesta ante cortes de energía, nuevos servicios de ahorro de consumo para viviendas y edificios de oficinas, mercado de energía y estaciones de carga inteligentes para vehículos electrónicos.
- *Smart Health:* Se cubre el monitoreo y diagnóstico de condiciones basados en dispositivos móviles y exige baja latencia y alto ancho de banda, además de los requisitos generales de baja potencia, seguridad y privacidad de datos de 5G.
- *Aplicaciones industriales:* Se encuentra la Industria IoT 4.0 la cual representa la próxima generación de servicios ciber físicos en términos de fabricación, comunicación de máquina a máquina (M2M), impresión 3D y construcción compatible con IA (Inteligencia Artificial). 5G proporcionará una confiabilidad críticamente alta, latencia ultrabaja, soporte de implementación masiva, seguridad y privacidad.
- *Aplicaciones de consumo:* Incluyen transmisión móvil ultra HD (4K/8K), tecnología financiera basada en blockchain (FinTech), juegos generalizados, realidad mixta móvil AR/VR servicios respaldados por vehículos aéreos no tripulados y tecnología holográfica. La tecnología 5G ayudará a soportar una amplia conectividad, alto ancho de banda, baja latencia, baja huella de energía, confiabilidad y seguridad del enlace.

4.2. Sistemas de balanceo de carga

Shiwei (2021) describe al balanceo de carga como la distribución del tráfico de red o la carga de trabajo entre múltiples recursos para mejorar el rendimiento general de la red. En las redes inalámbricas heterogéneas, el balanceo de carga es importante para optimizar la utilización de los recursos y evitar la congestión al distribuir uniformemente a los usuarios a través de celdas de red o estaciones base. De manera similar, Sun et al. (2019) expresó que el equilibrio de carga en redes inalámbricas implica la asignación eficiente de recursos, como el ancho de banda de la red, la potencia de procesamiento y la capacidad de esta para garantizar un rendimiento óptimo, mejorar la utilización de recursos y evitar la congestión. Por otro lado, acorde a Zhang et al. (2018), el balanceo de carga en las redes de centros de datos implica el proceso de distribución del tráfico

entrante en múltiples servidores o recursos de red para mejorar el rendimiento, evitar la sobrecarga de un solo servidor y garantizar el uso eficiente de los recursos disponibles.

4.3. Contexto social en redes móviles

Como señalan Torres et al. (2021), el contexto o conciencia social se refiere a la capacidad de los sistemas informáticos para razonar sobre la información del contexto y cambiar sus aplicaciones en consecuencia, especialmente en lo que respecta a la interacción entre los usuarios de dispositivos móviles en redes sociales y otras fuentes de información. Por lo cual, es beneficiosa para la operación, administración y mantenimiento al permitir una gestión adecuada de los recursos de red. Por otra parte, acorde a Ma et al. (2020), el contexto social es la capacidad del sistema de equilibrio de carga y optimización para tener en cuenta varios factores contextuales, como la ubicación del usuario, los patrones de tráfico, las condiciones de la red y las preferencias del usuario, para hacer decisiones proactivas que optimizan el rendimiento de la red y la experiencia del usuario en áreas urbanas.

4.4. Lógica difusa (Aprendizaje semi-automático)

En 1995, Zadeh creó la teoría de la lógica difusa para ayudar a las personas a una mejor toma de decisiones posibles en situaciones impredecibles que suelen representar ambigüedad y que son difíciles de definir (Klir et al., 1997). La lógica difusa es usada para mapear la relación existente entre la entrada y la salida, pues es una métrica que ayuda a interpretar los valores en el vector de entrada y asigna valores al vector de salida (Reznik, 1997). En otras palabras, los sistemas de lógica difusa (FLS) permiten la definición de posiciones de valor intermedio entre evaluaciones tradicionales porque tienen un valor que se encuentra en algún lugar entre verdadero y falso, el cual no puede ser simultáneamente verdadero o falso (Ardi et al., 2021). Descrito de otra manera, Hegazy et al. (2018) señala que los sistemas que utilizan la lógica difusa se asemejan consistente y estrechamente a las funciones algebraicas, pero que no requieren la representación matemática de un sistema debido a que son capaces de tener formulaciones exactas y sistemas estables de circuito cerrado. Además, con el fin de definir los conjuntos difusos, la lógica difusa y las bases de reglas difusas, los sistemas difusos se basan en el conocimiento previo de los expertos. Acorde a Topaloglu (2018), los sistemas de inferencia difusa más populares son los controladores difusos de Mamdani y Sugeno, propiamente ambos enfoques se basan en reglas difusas; Mamdani usa la teoría difusa como guía, mientras que Sugeno usa la función lineal de diversidad de entrada.

Como se mencionó anteriormente, en la lógica difusa se le puede asignar a una variable cualquier valor real que va de 0 a 1, o sea, el valor no será completamente verdadero o falso debido a que esta es una forma de lógica multivaluada (Sreejith & Rajak, 2020). Su arquitectura está conformada por:

1. **Base de Reglas:** comprende el conjunto de condiciones y reglas SI-ENTONCES que dirigen la toma de decisiones en el ajuste del controlador difuso. De manera similar, Silva et al. (2018) expresaron que la base de reglas comprende todas las relaciones posibles entre los parámetros de entrada y salida del sistema en formato SI-ENTONCES.
2. **Fuzificador:** transforma entradas nítidas como cualquier valor de verdad, en conjuntos difusos.
3. **Motor de Inferencia:** en función de los campos de entrada, determina qué reglas se deben seguir. Dichas reglas son integradas luego para ejecutar las acciones de control.
4. **Defuzificador:** transforma la salida difusa en valores claros. En otras palabras, como señalaron Silva et al. (2018), el defuzificador proporciona una acción de control no difusa a partir de una acción de control difusa inferida.

Se ha considerado importante incluir el concepto de lógica difusa en del marco teórico debido a que este tipo de lógica es utilizada en la evaluación de sistemas de balanceo de carga en redes móviles y estos sistemas implican tomar decisiones basadas en múltiples factores que pueden ser difíciles de cuantificar y modelar con precisión. En la evaluación de sistemas de balanceo de carga, la lógica difusa puede ayudar a manejar la incertidumbre y la imprecisión de los datos de entrada. Así, para el tema de investigación, precisamente la lógica difusa ayuda a ajustar los parámetros de los algoritmos de balanceo de carga para lograr un mejor rendimiento en situaciones cambiantes y dinámicas en tiempo real en la red simulada.

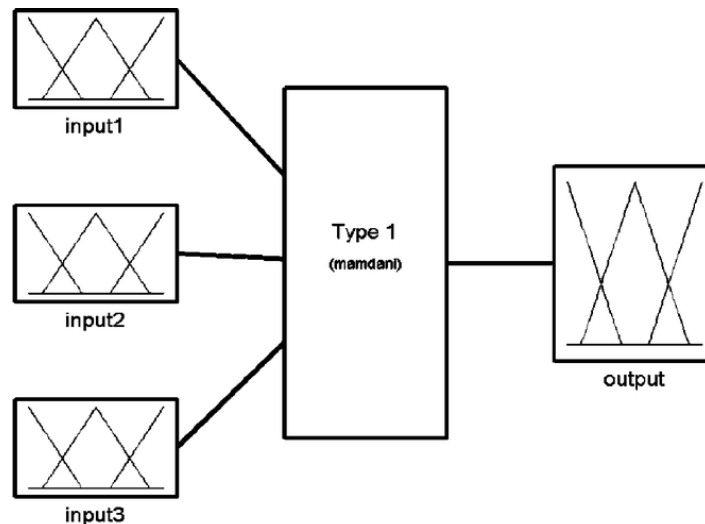
4.4.1. Controlador de lógica difusa de Mamdani

Ebhasim Mamdani creó la teoría de lógica difusa denominada Teoría de la inferencia difusa de Mamdani la cual establece que un controlador de Mamdani usa un conjunto de principios de control lingüístico obtenidos de operadores humanos expertos. La salida de cada regla en el sistema de inferencia de Mamdani será un conjunto de lógica difusa y la defuzificación de las reglas produce un resultado claro. Debido a que las bases de sus reglas son más comprensibles y sencillas, los sistemas de este tipo son particularmente adecuados para aplicaciones de sistemas expertos donde las reglas se generan a partir del conocimiento experto humano (Rehman et al., 2022).

Además, el controlador de Mamdani utiliza el método del centro de gravedad para la defuzificación y es utilizado con mayor frecuencia, particularmente para aplicaciones de soporte de decisiones debido a su naturaleza interpretada e intuitiva desde la base de reglas (Sari et al. 2016). A continuación, en la **Figura 2** se encuentra una gráfica de ejemplo de la conformación de un controlador de lógica difusa de Mamdani.

Figura 2.

Controlador de lógica difusa de Mamdani

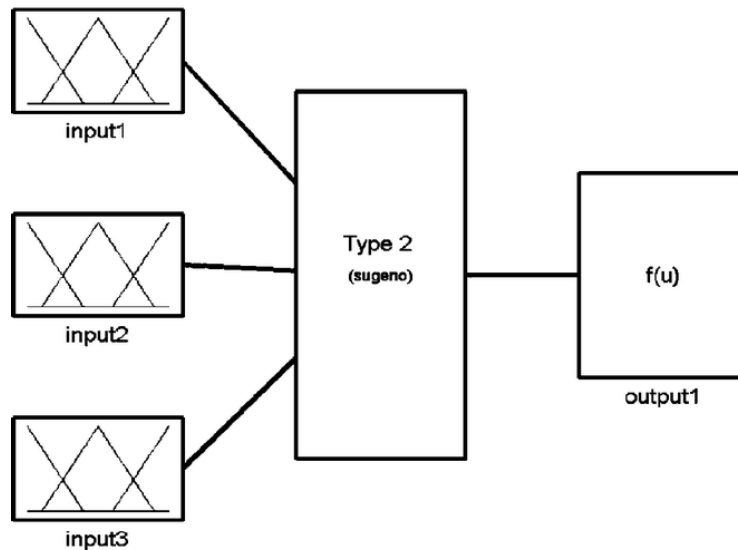


Nota. Tomado de *Fuzzy modeling of strength–composition–process parameter relationships of HSLA steels* (p.763), por S. Datta, & M. K. Banerjee, 2005, Taylor and Francis Group.

4.4.2. Controlador de lógica difusa de Sugeno

Los controladores de lógica difusa de Sugeno comúnmente se denominan inferencia difusa de Sugeno o inferencia difusa de Takagi-Sugeno-Kang. Un controlador de Sugeno utiliza funciones de pertenencia de salida singleton que son constantes o una función lineal de los valores de entrada y su defuzificación utiliza un promedio o una suma ponderados de una pequeña cantidad de puntos de datos en lugar de determinar el centroide de un área bidimensional, lo que la hace más eficiente desde el punto de vista computacional que la defuzificación de Mamdani (Rehman et al., 2022). El controlador de Sugeno calcula una salida nítida utilizando un promedio ponderado. Este tipo de controlador puede manejar una defuzificación promedio ponderada más rápidamente (Sari et al. 2016). A continuación, en la **Figura 3** se encuentra una gráfica de ejemplo de la conformación de un controlador de lógica difusa Sugeno.

Figura 3.
Controlador de lógica difusa Sugeno



Nota. Tomado de *Fuzzy modeling of strength–composition–process parameter relationships of HSLA steels* (p.763), por S. Datta, & M. K. Banerjee, 2005, Taylor and Francis Group.

4.5. Machine Learning (Aprendizaje Automático)

De acuerdo con Mahesh (2020), el aprendizaje automático (ML) enseña a las computadoras cómo manejar los datos de manera más efectiva. De otro modo, François-Lavet et al. (2018) expresaron que el aprendizaje automático pone a disposición técnicas automatizadas que pueden encontrar patrones en los datos y se pueden usar para completar algunas tareas.

La inclusión del concepto de machine learning en el marco teórico es fundamental, pues dentro del trabajo a desarrollar es imprescindible el uso de técnicas que optimicen procesos, y el aprendizaje automático es una técnica que permite analizar grandes cantidades de datos, adaptarse a cambios dinámicos, tomar decisiones precisas y proactivas, y mejorar la eficiencia de la red. Al ayudar a comprender patrones de tráfico y comportamiento de usuarios, detectar anomalías y problemas, y optimizar la distribución de carga, mejora la capacidad de la red para brindar un servicio de calidad y una mejor experiencia al usuario.

4.5.1. Supervised Learning (Aprendizaje Supervisado)

El aprendizaje supervisado es un tipo de aprendizaje automático. De acuerdo con Dike et al. (2018), este aprendizaje asigna datos de entrada a datos de salida utilizando pares de entrada-salida como ejemplo. En cambio, François-Lavet et al. (2018) señalaron que el aprendizaje supervisado (SL) es el proceso de determinar una clasificación o regresión a partir de datos de entrenamiento que han sido etiquetados. De manera similar, Mahesh (2020) destacó que este tipo

de aprendizaje utiliza datos de entrenamiento etiquetados compuestos por una colección de ejemplos de entrenamiento para inferir una función.

4.5.2. Unsupervised Learning (Aprendizaje No Supervisado)

Según expresaron Dike et al. (2018), el aprendizaje no supervisado se refiere a la capacidad de una red para aprender a representar algunos diseños de entrada de manera que reproduzca la disposición numérica de todos los diseños o patrones de entrada juntos. Por otro lado, François-Lavet et al. (2018) señalaron que el proceso de hacer inferencias a partir de conjuntos de datos de entrada sin respuestas etiquetadas es la tarea del aprendizaje no supervisado.

4.5.3. Reinforcement Learning (Aprendizaje por Refuerzo)

Como señalaron Hegazy et al. (2018), el estudio del aprendizaje por refuerzo se centra en cómo se pueden mejorar los sistemas mediante el uso de recompensas y sanciones, así, el método Q-learning es uno de los métodos populares de aprendizaje por refuerzo. En cambio, Dike et al. (2018) expresaron que el aprendizaje por refuerzo (RL) es el proceso de aprendizaje a través de la interacción con el entorno. Aquí el agente que use el aprendizaje por refuerzo aprenderá de las implicaciones de sus acciones en lugar de ser educado explícitamente, y elige sus acciones basándose tanto en el conocimiento previo como en las nuevas opciones, que es esencialmente un método de aprendizaje de prueba y error. En resumen, como lo indicaron François-Lavet et al. (2018), el objetivo del aprendizaje por refuerzo (RL) es enseñar a los agentes las mejores secuencias de acciones a realizar en un entorno determinado para maximizar las recompensas acumulativas.

4.5.4. Deep Learning (Aprendizaje Profundo)

Shinde y Shah (2018) manifestaron que el aprendizaje automático incluye el aprendizaje profundo como un subconjunto y que existen numerosas capas y parámetros en esta red neuronal. Así, en palabras de estos autores, el aprendizaje profundo (DL) es efectivo para descifrar y obtener conocimiento tanto de cantidades masivas de datos como de datos recopilados de varias fuentes.

4.5.5. Deep Reinforcement Learning (Aprendizaje por Refuerzo Profundo)

Como expresaron Wang et al. (2022), el aprendizaje por refuerzo profundo (DRL) combina la capacidad de toma de decisiones en el aprendizaje por refuerzo con la función de percepción del aprendizaje profundo. Además, es considerado IA real porque utiliza una forma de inteligencia artificial que es más similar al pensamiento humano.

4.6. Parámetros indicadores de rendimiento en redes móviles

Según explicó Haryadi (2018), el término KPI significa indicador clave de rendimiento, una medida cuantificable del rendimiento a lo largo del tiempo para un objetivo específico. De manera similar, Krasniqi et al. (2019) expresó que el rendimiento de una red se evalúa utilizando los KPI, además esos indicadores deben elegirse de modo que reflejen el uso de recursos y el rendimiento del usuario final y también se pueden utilizar para encontrar características de rendimiento no deseadas de la red.

4.6.1. RSRP (Reference Signal Received Power)

RSRP es un tipo de medición RSSI la cual se mide en [dB]. Es la potencia de las Señales de Referencia LTE distribuidas en todo el ancho de banda y banda estrecha. Como indicaron Awad y Mkwawa (2017), en las redes celulares, la potencia recibida de la señal de referencia (RSRP) se ha utilizado ampliamente para el mecanismo de traspaso en las redes de evolución a largo plazo (LTE). Entonces, la RSRP se define como el promedio lineal de las contribuciones de potencia de los elementos de recursos que transportan señales de referencia específicas de celda dentro del ancho de banda de frecuencia de medición considerado. De manera similar, Silva et al. (2018) expresaron que la cobertura de la celda se muestra mediante la medición de RSRP, misma que luego es usada para clasificar varias celdas principales de acuerdo con su RSRP. Sus valores típicos en LTE están en un rango de -140dB a -44dB, mientras que en 5G, van de -156 dB a -31 dB.

4.6.2. RSRQ (Reference Signal Received Quality)

RSRQ es un tipo de medición C/I que indica la calidad de la señal de referencia recibida. Se mide en [dB]. La medición RSRQ proporciona información adicional cuando RSRP no es suficiente para tomar una decisión confiable de cambio de celda o reelección de celda. En otras palabras, la intensidad de la señal recibida y la calidad del mediador de interferencia (C/I) se introducen mediante la calidad de la señal de referencia recibida (RSRQ). En caso de transmisión segura, la calidad de la señal de interferencia recibida ofrece información extra que es insuficiente (Noj & Kumar 2022). Los valores típicos en LTE están en un rango de -20dB a -3dB y en 5G van de -20dB a 0dB.

4.6.3. RSSI (Received Signal Strength Indicator)

El Indicador de la Intensidad de la Señal Recibida (RSSI) se mide en [dBm] y se puede definir como toda la potencia de banda ancha detectada por el UE desde todas las fuentes, incluido el ruido térmico y la interferencia producida en el eNodeB (Nodo B evolucionado) de destino (Noj

& Kumar 2022). Los valores típicos en LTE están en un rango de -120dBm a 0dBm y en 5G van de -120dBm a -13dBm.

4.6.4. SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio)

Según mencionaron Imoize y Adegbite (2018), la relación señal a ruido más interferencia (SINR) tiene como unidad de medida el [dB], mide el componente no deseado de una señal y puede calcularse como la diferencia entre la potencia de la señal y el total de la potencia de interferencia promedio de las celdas cercanas más el ruido de fondo. Para la SINR, los valores típicos en LTE están en un rango de 0dB a 20dB y en 5G van de -23dB a 40dB.

Finalmente, en la Figura 4 se presenta una gráfica de la tabla definida de métricas en LTE donde destacan las métricas de rendimiento más importantes para el funcionamiento de una red de este tipo.

Figura 4.

Métricas LTE incluyendo RSRP, RSRQ y SINR

		RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Condiciones RF	Excelente	≥ -80	≥ -10	≥ 20
	Bueno	-80 a -90	-10 a -15	13 a 20
	Centro de la celda	-90 a -100	-15 a -20	0 a 13
	Borde de la celda	≤ -100	≤ -20	≤ 0

Nota. Tomado de *LTE RSRQ to SINR*, por CableFree, 2016, <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-rsrq-sinr/>

4.6.5. Tasa de transferencia efectiva (Throughput)

La tasa de transferencia efectiva es una medida de la velocidad a la que se pueden transmitir datos o información a través de un canal o red de comunicación dentro de un período de tiempo específico. Es una métrica esencial para evaluar la eficiencia y la capacidad de un sistema en el manejo de la transmisión de datos. Según Forouzan y Fegan (2012), el throughput se refiere a la velocidad a la que se transfieren los bits entre un emisor y un receptor a través de un canal de comunicación. Ahmed et al. (2016) definen a la tasa de transferencia efectiva como la cantidad de paquetes de datos exitosos recibidos por el destino por unidad de tiempo. De manera similar, Abo Elsoud y El-Nainay (2015) describen al throughput como el conteo de bits o paquetes que se transmiten con éxito desde el origen hasta el destino dentro de un período de tiempo determinado.

4.7. Parámetros de optimización en redes móviles

4.7.1. Margen de Traspaso (HOM)

Un sistema debe permitir que los usuarios se muevan de manera confiable sin perder ninguna de sus llamadas o datos, por eso se presenta la técnica de handover (HO) la cual permite que un usuario conectado transfiera su sesión de una estación base a otra sin desconectarse. De esta forma se describen dos tipos de handover en las redes móviles: hard handover (HH) y soft handover (SH). El usuario es desconectado de la celda de origen durante un hard handover y luego es conectado a la celda de destino. En cambio, durante un soft handover, antes de desconectarse de la celda de origen, el usuario se conecta a la celda de destino. También se toma en cuenta que solo se admite hard handover en LTE (Fallaha et al., 2019). En resumen, como mencionó Saeed (2019), cuando un usuario se mueve de un lugar a otro, el mecanismo de handover mantiene activa la sesión de comunicación del usuario.

4.7.2. Control de potencia (PTS)

El control de potencia en telecomunicaciones implica ajustar la potencia de transmisión de terminales móviles o estaciones base en un sistema celular para optimizar la calidad de la señal recibida (Molisch, 2011). También incluye la regulación de la potencia transmitida en el transmisor para lograr el nivel deseado de calidad de la señal en el receptor y, al mismo tiempo, minimizar la interferencia con otros usuarios de la red y, en última instancia, mejorar la capacidad del sistema (Haykin & Moher, 2005). Además, el control de potencia sirve como mecanismo para mantener una relación señal/interferencia deseada ajustando la potencia de transmisión de cada usuario en una red inalámbrica, maximizando así la capacidad del sistema y minimizando la interferencia (Garg et al., 2005). En conclusión, tal como Wicker (1999) destaca, el control de potencia implica ajustar el nivel de potencia transmitida de un dispositivo de comunicación inalámbrico en función de las condiciones del canal, la distancia y la interferencia para garantizar una comunicación fiable y eficiente.

4.7.3. Ángulo de inclinación de antenas (TILT)

Según Zander et al. (1996), TILT se define como "el ángulo vertical del haz principal de una antena con respecto al plano horizontal". Se refiere a la inclinación mecánica de las antenas para controlar el área de cobertura y la dirección del lóbulo principal del diagrama de radiación. De manera similar, en el libro "Wireless Communication Networks and Systems" de Stallings y Van Slyke (2013), la inclinación se describe como "la inclinación de una antena para ajustar su

diagrama de radiación verticalmente, proporcionando la cobertura y la intensidad de señal deseadas en áreas específicas”, haciendo hincapié en el propósito de ajustar el patrón de radiación para lograr la cobertura deseada y la intensidad de la señal en áreas específicas.

Como es de conocimiento general, la efectividad de una red celular depende de la alineación adecuada de las antenas de transmisión y recepción, y la disposición de los sistemas radiantes. Regular correctamente las inclinaciones, o la inclinación de la antena con respecto a un eje es una de las tareas de optimización del sistema más cruciales debido a que, con la inclinación enfocamos la energía en la nueva dirección deseada. El término downtilt (inclinación hacia abajo) se usa con mayor frecuencia cuando la antena está inclinada hacia abajo. Cuando se quiere limitar la interferencia y/o la cobertura en algunas áreas mientras cada celda cubre su área deseada, se usa el tilt (Akpado et al., 2013).

4.7.4. Medida de equidad de carga (Load fairness)

Acorde a Gao et al. (2009), load fairness es la medida de equidad de carga que se define como "la distribución de la carga de tráfico entre las celdas de una red celular para lograr una utilización equilibrada de los recursos de la red y evitar la congestión en celdas específicas". Se centra en lograr una distribución equilibrada de la carga de tráfico para garantizar una utilización eficiente de los recursos y evitar la congestión en células concretas. De manera similar, Stallings y Van Slyke (2013) expresaron que, la equidad de carga se describe como "el objetivo de garantizar que cada celda de una red inalámbrica transporte un número aproximadamente igual de usuarios, evitando así que una sola celda se sobrecargue mientras otras permanecen sin utilizar". Así, destaca el objetivo de igualar la distribución de usuarios entre celdas para mantener un rendimiento equilibrado de la red. También Khattab et al. (2014) definen a la medida de equidad de carga como "el concepto de distribuir la carga de tráfico uniformemente entre las celdas para lograr una asignación justa de los recursos y maximizar la capacidad de la red". Estos autores hacen hincapié en la noción de distribución equitativa de la carga de tráfico para optimizar la asignación de recursos y mejorar la capacidad global de la red.

4.8. Estado del arte sobre sistemas de balanceo de carga en redes móviles

Las soluciones de balanceo de carga en redes celulares han demostrado ser cruciales para evitar la sobrecarga de la red y mantener la asignación de recursos y el rendimiento adecuados a lo largo del tiempo. Sin embargo, los sistemas tradicionales no fueron construidos para manejar la dinámica que trae la actividad del usuario. Debido a su alta asociación con el tráfico de la red, la

movilidad de los usuarios que asisten a eventos sociales masivos tiene un impacto significativo en el rendimiento de la red. A razón de la expansión de las bases de datos de geolocalización y otras funciones en las redes sociales, la disponibilidad de información sobre eventos está aumentando exponencialmente.

4.8.1. Sistemas de balanceo de carga

Como es de conocimiento, muchos trabajos de investigación se encuentran enfocados en establecer un sistema de balanceo de carga para redes móviles el cual funcione de manera automática o lo más cercano a este funcionamiento. De esta manera, Shiwei (2021) propuso un algoritmo de balanceo de carga para redes inalámbricas que estima el estado de movimiento de los usuarios para distribuir el tráfico entre las estaciones base disponibles. En cambio, Rodríguez et al. (2011) y Muñoz et al. (2013) en sus trabajos presentaron técnicas de balanceo de carga en redes LTE para mejorar el rendimiento y la satisfacción del usuario utilizando lógica difusa y varios parámetros de red para lograr sus objetivos. Sin embargo, Rodríguez et al. (2011) se enfocaron a redes LTE en un entorno urbano realista y Muñoz et al. (2013) a redes de femtoceldas LTE. Por otro lado, en el trabajo de Sharma et al. (2012) se proporcionó una descripción general de las técnicas de equilibrio de carga en redes celulares, incluidos los enfoques tradicionales y emergentes, así como sus ventajas y limitaciones, mientras que Guoqin et al. (2005) analiza una técnica de equilibrio de carga que selecciona el tráfico en función de las condiciones de la red y la descarga a las celdas vecinas, lo que reduce la congestión y mejora el rendimiento de la red en redes celulares superpuestas heterogéneas. Existen otros esquemas como el de Yanmaz y Tonguz (2005) y los de Zhang et al. (2015) donde los primeros hacen uso de esquemas de balanceo de carga dinámico, mientras que, la segunda investigación se centra en el uso de un esquema específico de comunicación de dispositivo a dispositivo (D2D) como medio de balanceo de carga.

4.8.2. Contexto social aplicado a balanceo de carga

Habiendo establecido de manera inicial algunas investigaciones relacionadas al balanceo de carga, se mencionará ahora la aplicación del contexto social al mismo. De esta manera, Aguilar et al. (2016) y Mathieu et al. (2007) proponen sistemas de autogestión que se adaptan a las condiciones cambiantes de la red para mejorar el rendimiento y la experiencia del usuario. Aguilar et al. (2016) investigaron acerca del balanceo de carga en redes de celdas pequeñas, mientras que Mathieu et al. (2007) se enfocaron a redes superpuestas y utilizaron la información de contexto para tomar decisiones. Por otro lado, Acharya et al. (2014) exponen una red social avanzada que

utiliza tecnologías como servicios basados en la ubicación, dispositivos portátiles y análisis de gráficos sociales para ser conscientes del contexto y las relaciones sociales de los usuarios, proporcionando información personalizada. En cambio, Kodikara et al. (2008) únicamente analizan la importancia de la conciencia del contexto en las redes inalámbricas para un rendimiento de red eficiente y eficaz y presentan algunos métodos para la adaptación consciente del contexto. Así como en el trabajo de Mathieu et al. (2007), Lemlouma y Layaida (2004) propusieron un mecanismo de adaptación sensible al contexto para que los dispositivos móviles mejoren la experiencia y el rendimiento del usuario mediante el ajuste dinámico de la configuración y las aplicaciones del dispositivo en función del contexto de uso. Además, el artículo presentado por De y Moessner (2009) muestra un marco que consta de varios componentes, incluido un modelo de contexto, un motor de inferencia y un motor de adaptación para desarrollar aplicaciones móviles conscientes del contexto, lo que permite aprovechar la información del contexto para brindar servicios más personalizados y eficientes a los usuarios. En comparación a los trabajos anteriormente mencionados, Ma et al. (2020) y Simsek et al. (2015) proponen enfoques basados en machine learning para mejorar la experiencia del usuario y optimizar el rendimiento de las redes móviles. De esta manera, Ma et al. (2020) estudia el balanceo de carga y la optimización de redes 5G en áreas urbanas y Simsek et al. (2015) la gestión de movilidad en redes heterogéneas. Ambos estudios utilizan la información del contexto, incluyendo el comportamiento del usuario y los factores ambientales, para tomar decisiones más informadas y mejorar la eficiencia de la red.

Por otra parte, Li et al. (2015) y Zhang et al. (2015) buscan mejorar la comunicación de dispositivo a dispositivo (D2D) en redes celulares mediante el uso de relaciones sociales y la conciencia del contexto de los usuarios móviles. En la investigación de Li et al. (2015) se presentó la asignación de recursos para D2D, mientras que Zhang et al. (2015) se enfocaron en el descubrimiento de pares. Estos trabajos muestran que el uso de la conciencia social mejora el rendimiento de la red y la satisfacción del usuario en comparación con los métodos tradicionales. Similarmente, Villegas et al. (2021) plantearon un pronóstico con conciencia social con el objetivo de mejorar la gestión de la red y la experiencia del usuario para predecir el desempeño futuro de las redes celulares, mediante la incorporación de funciones de redes sociales en los modelos de pronóstico tradicionales. Un ejemplo más claro de la aplicación de conciencia social a balanceo de carga se evidencia en la investigación de Torres et al. (2021), donde se propone un sistema de equilibrio de carga con conciencia social para multitudes en redes celulares que tiene en cuenta el

comportamiento social de los usuarios para distribuir los recursos de la red de manera eficiente, reduciendo la congestión y mejorando el rendimiento de la red.

Hablando específicamente de contexto y conciencia sociales, difieren en algunos aspectos tomando en cuenta cuál es su fuente de información principal, de esta manera, podemos diferenciarlas de una mejor manera con la ayuda de algunos conceptos presentados a continuación. Kodikara et al. (2008) especificó que la conciencia social es la capacidad de los dispositivos en una red de comunicación para aprovechar las relaciones sociales o el contexto a fin de mejorar la eficiencia energética durante la comunicación de dispositivo a dispositivo (D2D). Sin embargo, Villegas et al. (2021) se explica que, utiliza datos y análisis de redes sociales para predecir el rendimiento de la red celular, considerando interacciones sociales y comportamientos de los usuarios para mejorar la precisión de los pronósticos.

En cambio, como lo expresó Boldrini et al. (2010), el contexto social en las redes inalámbricas se refiere a la capacidad de adaptarse al entorno cambiante y a los usuarios para optimizar el rendimiento y experiencia e incluye factores como ubicación, comportamiento del usuario, recursos disponibles y condiciones de la red. No obstante, Lemlouma y Layaida (2004) relacionan al concepto con la adaptación del comportamiento y contenido de los dispositivos móviles al contexto que los rodea para mejorar la experiencia del usuario y permitir interacciones personalizadas y relevantes. Finalmente, Aguilar et al. (2016) se expresó que la conciencia social permite a las redes de celdas pequeñas adaptarse y optimizar su funcionamiento en función del contexto cambiante del entorno, incluyendo factores como el tráfico de la red, el comportamiento del usuario y las condiciones ambientales para mejorar su rendimiento.

4.8.3. Algoritmos semi-autónomos y autónomos

Acorde a Klir et al. (1997), Zadeh creó la teoría de la lógica difusa en 1995 para ayudar a las personas a una mejor toma de decisiones posibles en situaciones impredecibles que suelen representar ambigüedad y que son difíciles de definir. Así, Reznik, (1997) explicó que la lógica difusa es usada para mapear la relación existente entre la entrada y la salida, pues es una métrica que ayuda a interpretar los valores en el vector de entrada y asigna valores al vector de salida. En otras palabras, como lo explicaron Ardi et al. (2021), los sistemas de lógica difusa (FLS) permiten valores intermedios entre verdadero y falso y se basan en el conocimiento de expertos. De esta manera, Topaloglu (2018) menciona que los sistemas de inferencia difusa más populares son los controladores difusos de Mamdani y Sugeno, propiamente ambos enfoques se basan en reglas

difusas; Mamdani usa la teoría difusa como guía, mientras que el controlador Sugeno usa la función lineal de diversidad de entrada.

De acuerdo con Mahesh (2020), el aprendizaje automático (ML) enseña a las computadoras cómo manejar los datos de manera más efectiva. Así, François-Lavet et al. (2018) señalaron que el aprendizaje automático pone a disposición técnicas automatizadas que pueden encontrar patrones en los datos y se pueden usar para completar algunas tareas. El aprendizaje supervisado es un tipo de aprendizaje automático y como especificaron Dike et al. en 2018, este aprendizaje asigna datos de entrada a datos de salida utilizando pares de entrada-salida como ejemplo. En cambio, como explicaron François-Lavet et al. (2018), el aprendizaje supervisado (SL) es el proceso de determinar una clasificación o regresión a partir de datos de entrenamiento que han sido etiquetados. De manera similar, Mahesh (2020) destacó que este tipo de aprendizaje utiliza datos de entrenamiento etiquetados compuestos por una colección de ejemplos de entrenamiento para inferir una función.

Como es posible evidenciar acorde a Porch et al. (2020), dentro de la investigación se ocupan varios algoritmos como los que se mencionan a continuación:

- K-Nearest Neighbor (KNN): algoritmo de clasificación supervisado.
- Random Forest (RF): método de aprendizaje conjunto para detección de fallas.
- Support Vector Machine (SVM): un algoritmo de aprendizaje supervisado para diagnóstico de fallas.
- Red neuronal convolucional (CNN): arquitectura de aprendizaje profundo para ajuste en modelos.

Por otro lado, Gaber et al. (2019) utilizaron ciertos algoritmos para la optimización del control de energía de la red celular mediante el aprendizaje automático no supervisado los cuales incluyen la agrupación de medios K y el análisis de componentes principales (PCA) para el análisis de datos y la toma de decisiones, así como la regresión lineal para modelar la relación entre los parámetros de la red de acceso de radio (RAN). y los valores del indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI). En cambio, Suknum et al. (2022) y Aboelwafa et al. (2022) utilizaron algoritmos de aprendizaje por refuerzo para optimizar el rendimiento de la red celular, en particular, la asignación de recursos. Así, Suknum et al. (2022) utilizaron el algoritmo Q-learning, mientras que, Aboelwafa et al. (2022) utilizaron un marco de aprendizaje de refuerzo profundo con algoritmos

como redes neuronales profundas, Q-learning y PPO (Proximal Policy Optimization) además de un espacio de acción híbrido.

4.8.4. HOM como medida de balanceo de carga

Según Lin y Ci (2012), el margen de traspaso (HOM) es un parámetro que controla la decisión de traspaso en una red celular, indicando el umbral de intensidad de señal recibida en el que debe producirse un traspaso, en otras palabras, desempeña un papel crucial en el mantenimiento del balanceo de carga al determinar cuándo un dispositivo móvil debe cambiar de una célula a otra en función de las mediciones de la intensidad de la señal. Por otro lado, Stallings y Van Slyke (2013), describe al HOM como la diferencia entre la intensidad de la señal recibida de la celda de servicio actual y las celdas vecinas, utilizada para desencadenar traspasos con fines de balanceo de carga. De manera similar a Lin y Ci (2012), en el estudio de Han et al. (2017), HOM se define como la intensidad mínima de señal recibida necesaria para que se produzca un traspaso, y se ajusta para controlar el equilibrio de carga entre celdas. En resumen, es un parámetro que se puede ajustar para optimizar el balanceo de carga influyendo en las decisiones de traspaso y equilibrando la distribución de usuarios entre celdas.

4.8.5. TILT como medida de balanceo de carga

Liu et al. (2016) definieron al ángulo de inclinación de las antenas (TILT) de las estaciones base como el ángulo al que se inclina mecánicamente una antena para ajustar el patrón de cobertura y las características de propagación de la señal de una estación base, de esta manera se especifica que es utilizado para controlar el área de cobertura y mejorar la calidad de la señal dentro de una región específica. De igual manera, Rappaport et al. (2019) describieron al TILT como el ángulo de inclinación de una antena en una estación base, que determina la dirección del lóbulo principal y controla el patrón de cobertura de la señal. Por último, en el estudio de Zhang et al. (2013), el TILT se define como el ángulo entre el lóbulo principal del patrón de una antena y el eje vertical, que puede ajustarse para mejorar la intensidad de la señal y la cobertura en una región deseada. Notablemente se debe tomar en cuenta que el ajuste de la inclinación suele realizarse para balancear los requisitos de cobertura y capacidad en distintas zonas de una celda.

5. Metodología

En esta sección se mostrará el contexto en el cual fue desarrollado el trabajo y su proceso de ejecución.

5.1. Contexto

El trabajo de titulación fue desarrollado en la ciudad de Loja como parte del proyecto de investigación titulado “Sistemas de balanceo de carga para redes móviles de última generación basado en contexto social” y que fue identificado y registrado con código único de registro 27-DI-FEIRNNR-2023. Dicho proyecto ha sido presentado por el docente Renato Benjamín Torres Carrión como parte de su investigación doctoral en la Universidad Nacional de Loja. El objetivo principal de esta investigación es analizar y desarrollar sistemas de balanceo de carga que sean aplicables a las redes móviles de última generación, tomando en consideración el contexto social en el que operan.

Las simulaciones por realizar tomarán en cuenta como escenario virtual al estadio “La Rosaleda” ubicado en España y se analizará el funcionamiento de un sistema de balanceo de carga existente. Para la realización de las simulaciones se efectuarán cambios de parámetros de entrada en los sistemas de balanceo de carga propuestos para la evaluación de su desempeño caracterizando una red móvil 4G LTE con diferentes números de usuario variando desde 300 a 1000 usuarios.

5.2. Proceso

Los objetivos del trabajo de titulación han sido realizados de acuerdo con el siguiente procedimiento:

1. Definir los parámetros de entrada del sistema de optimización de balanceo de carga basados en contexto social.
 - a. Se llevó a cabo una investigación acerca de los parámetros de optimización en redes móviles y sobre el balanceo de carga en redes móviles basado en contexto social, recopilando información de fuentes científicas y verificadas.
 - b. La información más relevante fue tomada en cuenta para desarrollo del marco teórico y para el posterior establecimiento de parámetros necesarios en un sistema de balanceo de carga para redes móviles en el desarrollo de la presente investigación.
 - c. Se establecieron como parámetros de entrada el ángulo de inclinación (TILT) de las antenas ubicadas en las estaciones base y el margen de traspaso (HOM) para un sistema

de balanceo de carga que funcionaría con la potencia de entrada (P_{tx}) de las antenas ubicadas en las estaciones base y la desigualdad de carga de usuarios.

2. Seleccionar el sistema de compensación de carga más adecuado basado en sistemas de control de lógica difusa.
 - a. Para cumplimiento de este objetivo se dio una revisión sistemática de información sobre sistemas de compensación de carga basados en sistemas de control, lo cual permitiría establecer los elementos que conformarían un sistema de compensación de carga que funcione de manera eficiente.
 - b. Se determinaron las características principales del sistema de compensación de carga para su correcto funcionamiento a partir de la información obtenida de fuentes verificadas como lo son libros y artículos científicos.
 - c. Luego de haber determinado las características necesarias para el sistema de compensación de carga, se procedió a realizar el diseño del sistema de control para el balanceo de carga basado en contexto social para su posterior análisis y evaluación.
3. Establecer el escenario y los parámetros de simulación en base a la tecnología de red móvil seleccionada.
 - a. Se procedió a realizar la selección de los escenarios de simulación tomando como base la tecnología de red móvil 4G, teniendo un escenario urbano macro para el desarrollo de la evaluación de parámetros en el sistema de compensación de carga basado en contexto social diseñado y su posterior evaluación de rendimiento.
 - b. Posteriormente, se efectuó el desarrollo de un prototipo virtual del sistema de control para el balanceo de carga y su respectiva simulación mediante el software Matlab en su versión 2022b.
 - c. A continuación, se llevó a cabo la evaluación de los parámetros de optimización escogidos como el margen de traspaso (HOM) y ángulo de inclinación de la antena (TILT), del sistema de lógica difusa funcionando con la potencia de entrada (P_{tx}) y la medida de equidad de carga para el balanceo de carga en redes móviles.
 - d. Además, se realizó la simulación del controlador de lógica difusa (FLC) tomando como referencia el contexto social, la información del “venue”, es decir, el punto de aglomeración o concentración de los equipos de usuario (UEs).

4. Obtener información de mejora de los indicadores de rendimiento basado en gráficas de mérito.
 - a. Luego de la obtención de las gráficas de simulación se procedió a analizar los resultados con el fin de evaluar la efectividad cada uno de los controladores con respecto a dos puntos sobre el escenario: en el centro y en el borde.
 - b. Identificar las similitudes y diferencias en los resultados entre el punto central y el punto del borde del escenario.
 - c. Se realizó una revisión del nivel de asistencia proporcionada por las celdas adyacentes en la distribución de usuarios para un rendimiento óptimo de la red en el punto del borde.
 - d. Identificar áreas de investigación futura que podrían explorar parámetros adicionales como la tasa de transferencia entre celdas (throughput) y la interferencia en las celdas para mejorar aún más las estrategias de equilibrio de carga en redes móviles macro urbanas.

5.3. Desarrollo

Para el desarrollo del trabajo de titulación se ha tomado como referencia algunos datos en base al trabajo realizado en 2021 por Torres et al. y que establece un sistema de balanceo de carga que usa conciencia social, sin embargo, para el presente caso se establecerá el uso de contexto social.

5.3.1. Diseño del Sistema de Balanceo de Carga

El sistema de balanceo de carga utilizado en esta investigación se basa en lógica difusa, lo cual implica la definición de reglas y asignación de valores continuos a la salida del controlador. En el desarrollo de este sistema, se consideraron dos casos diferentes que presentan variaciones en los parámetros de entrada, los cuales fueron evaluados posteriormente. La arquitectura de ambos sistemas consta de dos fases, siendo la segunda fase idéntica en ambos sistemas, ya que utiliza un controlador de distribución de tráfico de potencia basado en contexto social (CA-PTS). Este controlador utiliza información social para mejorar las respuestas del sistema. Por otro lado, la primera fase del sistema tiene como entrada la desigualdad de carga y otros parámetros como el margen de traspaso (HOM), la potencia de entrada (Ptx) y el ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base (TILT). A través de este enfoque, se busca optimizar la eficiencia del sistema de balanceo de carga en redes móviles.

5.3.2. Caracterización del escenario

Para realizar la caracterización del escenario se ha tomado en cuenta información que reposa en la versión 15 de la 3GPP TR 38.901 y en el reporte de la ITU-R M.2135-1 y que brevemente será señalada a manera de resumen a continuación:

Se puede presentar de manera inicial en la **Tabla 1** los parámetros usados para escenarios macro y micro urbanos en redes móviles, sin embargo, el sistema que se va a desarrollar posee las características que presenta un escenario Macro Urbano, pues el mismo se encuentra desarrollado para una red de 4 BSs, con 3 sectores cada una, dando un total de 12 sectores, con antenas ubicadas a una altura de 30m. Se debe tomar en cuenta que la tabla es una adaptación de la Tabla 8.2 del reporte de la ITU-R M.2135-1.

Tabla 1.

Parámetros para escenarios Macro y Micro Urbanos

Escenario de implementación para el proceso de evaluación	Celda micro urbana	Celda macro urbana
Altura de la antena de la estación base (BS)	10 m, bajo techo	25 m, sobre techo
Número de elementos de antena de la estación base	Hasta 8 rx Hasta 8 tx	Hasta 8 rx Hasta 8 tx
Potencia de transmisión total de la estación base	41 dBm para 10 MHz, 44 dBm para 20 MHz	46 dBm para 10 MHz, 49 dBm para 20 MHz
Clase de potencia del terminal de usuario (UT)	24 dBm	24 dBm
Sistema de antena de terminal de usuario	Hasta 2 tx Hasta 2 rx	Hasta 2 tx Hasta 2 rx
Distancia mínima entre terminal de usuario (UT) y la celda servidora	≥ 10 m	≥ 25 m
Frecuencia de la portadora (CF) para evaluación (representativo de bandas IMT)	2.5 GHz	2 GHz
Pérdida de penetración de edificios de exteriores a interiores	Mirar el Anexo 1, Tabla A1-2	N.A.
Pérdida de penetración al aire libre hacia el móvil	N.A.	9 dB (LN, $\sigma = 5$ dB)

Nota. Adaptado de la Tabla 8.2 del reporte de la ITU-R M.2135-1 *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced* por Series, 2009, p.14.

La **Tabla 2** que se presenta a continuación contiene información para el modelamiento de las antenas usadas de forma general para un escenario macro urbano en el que actuarán los sistemas de balanceo de carga, en este caso para el escenario LTE. Cabe recalcar que, la información es una adaptación de la Tabla 7.3-1 de la 3GPP TR 38.901.

Tabla 2.

Patrón de potencia de radiación de un solo elemento de antena

Parámetro	Valores
Corte vertical del patrón de potencia de radiación (dB)	$A_{\text{dB}}''(\theta'', \phi'' = 0^\circ) = -\min \left\{ 12 \left(\frac{\theta'' - 90^\circ}{\theta_{3\text{dB}}} \right)^2, SLA_V \right\}$ <p>with $\theta_{3\text{dB}} = 65^\circ, SLA_V = 30 \text{ dB}$ and $\theta'' \in [0^\circ, 180^\circ]$</p>
Corte horizontal del patrón de potencia de radiación (dB)	$A_{\text{dB}}''(\theta'' = 90^\circ, \phi'') = -\min \left\{ 12 \left(\frac{\phi''}{\phi_{3\text{dB}}} \right)^2, A_{\text{max}} \right\}$ <p>with $\phi_{3\text{dB}} = 65^\circ, A_{\text{max}} = 30 \text{ dB}$ and $\phi'' \in [-180^\circ, 180^\circ]$</p>
Patrón de radiación 3D (dB)	$A_{\text{dB}}''(\theta'', \phi'') = -\min \left\{ - (A_{\text{dB}}''(\theta'', \phi'' = 0^\circ) + A_{\text{dB}}''(\theta'' = 90^\circ, \phi'')), A_{\text{max}} \right\}$
Máxima ganancia direccional de un elemento de antena $G_{E,\text{max}}$	8 dBi

Nota. Adaptado de *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz* por 3GPP, 2018, p.22.

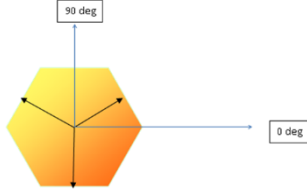
Además, para el desarrollo del trabajo también se incluye el uso de la Tabla 7.8-1 de la ITU-R M.2135-1 la cual contiene información sobre los modelos de propagación posibles en el escenario urbano macro LTE como lo son: con línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS).

Por último, se presenta la **Tabla 3** que proporciona datos útiles acerca de los parámetros necesarios para la calibración de un canal desde 0.5GHz a 100GHz, por eso es útil para este caso que es una red 4G LTE en un escenario urbano macro. La información de la tabla es una modificación de la Tabla 7.8-1 de la TR 38.901.

Tabla 3.

Asunciones de simulación para calibración de larga escala

Parámetro	Valores
Escenarios	UMA (Macro Urbano), UMi-Street Canyon (Micro Urbano – Cañón Urbano), Indoor-office (open office) u Oficina abierta o interior

Parámetro	Valores
Sectorización	3 sectores por sitio celular: 30, 150 y 270 grados 
Configuraciones de la antena de la estación base (BS)	$M_g = N_g = 1$; $(M,N,P) = (10, 1, 1)$, $d_v = 0.5\lambda$
Mapeo de puertos de la estación base (BS)	Los 10 elementos son mapeados a un único Puerto CRS
Inclinación eléctrica hacia abajo de la antena de la estación base (BS)	102 grados para UMa (Macro Urbano) y UMi Street Canyon (Micro Urbano – Cañón Urbano) 110 grados para interiores
Virtualización de la antena	Pre - codificación DFT según la norma TR 36.897 con aplicación de ángulos de paneo e inclinación
Potencia de transmisión (Ptx) de la estación base (BS)	44 dBm para UMi-Street Canyon (Micro Urbano – Cañón Urbano), 49 para UMa (Macro Urbano) en 6GHz 35 dBm en 30GHz y 70 GHz para UMa (Macro Urbano) y UMi-Street Canyon (Micro Urbano – Cañón Urbano) 24 dBm para Interiores para todas las frecuencias portadoras
Ancho de banda	20MHz para 6GHz, and 100MHz para 30GHz y 70 GHz
Configuraciones de antena de terminal de usuario (UT)	1 elemento (verticalmente polarizado), Patrón de ganancia de Antena Isotrópica
Margen de handover (para calibración)	0dB
Distribución de terminal de usuario (UT)	Siguiendo la norma TR36.873 para UMa y UMi, (descenso 3D) Descenso uniforme para interiores con mínima distancia (2D) de 0 m
Acoplamiento de terminal de usuario (UT)	Basado en la pérdida de trayectoria considerando el ángulo LOS (Línea de vista)
Figura de ruido de terminal de usuario (UT)	9 dB
Canal de desvanecimiento rápido	El canal de desvanecimiento rápido no está definido
Pérdida de penetración de O2I	50% de pérdida baja y 50% de alta pérdida
Frecuencia de portadora	6 GHz, 30 GHz, 70GHz
Método de envase para UMa (Macro Urbano) y UMi (Micro Urbano)	Contención basada en la distancia geográfica (mandatorio), distancia radio (opcional)
Métricas	1) Pérdida de acoplamiento – celda servidora (basada en pérdida de trayectoria LOS) 2) Geometría (basada en pérdida de trayectoria LOS) con y sin ruido blanco

Nota. Adaptado de *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz* por 3GPP (2018), p.76.

Para la realización de la evaluación del sistema de balanceo de carga basado en contexto social, se detallará las características más relevantes que se han tomado en cuenta a continuación:

5.3.3. Escenario de simulación

Acorde al reporte de la ITU-R M.2135-1, para la tecnología de red móvil 4G LTE, el escenario principal maneja en su canal 12 celdas. Este escenario se encontrará configurado con los valores presentados en la **Tabla 4**, los cuales constan en el reporte de la ITU-R M.2135-1 que es un documento que consta de Directrices para la evaluación de la interfaz radioeléctrica tecnologías para las IMT-Avanzadas.

Tabla 4.

Parámetros de configuración para la simulación de un escenario 4G LTE en Matlab

Elementos para la configuración del escenario	Parámetros	Valores
Estaciones base – BSs (Transmisores)	Potencia de la estación base – Pbs	44 dBm
	Altura de la estación base – hbs	30m
	Ubicación (La Rosaleda)	Latitud: 36.730172 Longitud: -4.431294
	Frecuencia de la portadora	0.7x10 ³ Hz
	Azimuth	90°
Equipos de usuario – Ues	Porcentaje de tráfico	0.9
	Probabilidad de movilidad aleatoria	0.5
	Altura del equipo de usuario -hut	1.5m
Antenas	Rango del ángulo azimuth	[-180:180]
	Rango del ángulo de elevación	[-90:90]
	Atenuación máxima	20dB
	Ángulo tilt (inclinación)	15°
	Ancho de banda en 3dB	Azimuth: 65 Elevación: 65
	Ancho de banda	20x10 ⁶ Hz
	Figura de ruido	7dB

Elementos para la configuración del escenario	Parámetros	Valores
	Ganancia del receptor	0dBi
	Altura de la antena receptora	1.5m
	Ángulo de inclinación hacia abajo (downtilt)	15°
Modelo de Propagación		$PL_1 = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$
	Línea de vista	$PL_2 = 28.0 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$
	Sin línea de vista	$PL'_{UMa-NLOS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5)$
Modelo de movilidad	Distancia inter-sitio	ISD: 500
	Movilidad aleatoria	Centro, Borde
	Movilidad exponencial	Centro, Borde

Nota. Elaboración propia

5.3.4. Parámetros de simulación

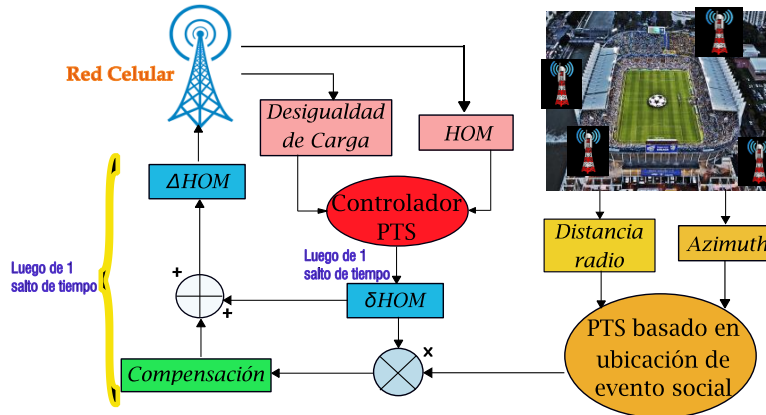
La simulación en el software Matlab se realizará en base al escenario 4G LTE, con la actuación de un sistema de balanceo de carga basado en información social. Los parámetros de entrada al sistema para su posterior evaluación y revisión de rendimiento son: el Margen de Traspaso o Handover (HOM), la Potencia de entrada (Ptx) y el Ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base (TILT), con el fin de elegir un sistema de balanceo de carga adecuado para mejorar la actuación de una red en altas condiciones de carga.

En la **Figura 5** se puede visualizar la conformación del primer sistema el cual posee dos etapas; la etapa inicial está conformada por un controlador de Potencia de Tráfico Compartido (PTS) el cual tiene como datos de entrada a la desigualdad de carga que se da entre las celdas y el handover (HOM) de celda a celda, obteniendo una variación de margen de traspaso (δ HOM) a la salida la cual será sumada y se obtendrá otra variación de handover (Δ HOM) en la siguiente fase del bucle para la optimización del sistema; la segunda etapa en cambio es un controlador basado en ubicación del evento social o basado en contexto social (CAPTS) que posee parámetros fijos como el azimuth de las antenas de las estaciones base y la distancia radio desde las estaciones base al punto de aglomeración (venue) que dependerán propiamente del sitio donde se evaluarán los parámetros, por ello se dice que se basa en información social. Este último a su salida se multiplica

con la salida de variación de margen de traspaso (δHOM) obteniendo valores de compensación que serán sumados a la salida de (δHOM) de manera que se obtenga otra variación del margen de traspaso (ΔHOM) que realimentará a la red celular y a todo el sistema.

Figura 5.

Sistema de balanceo de carga con parámetros de entrada: desigualdad de carga y HOM

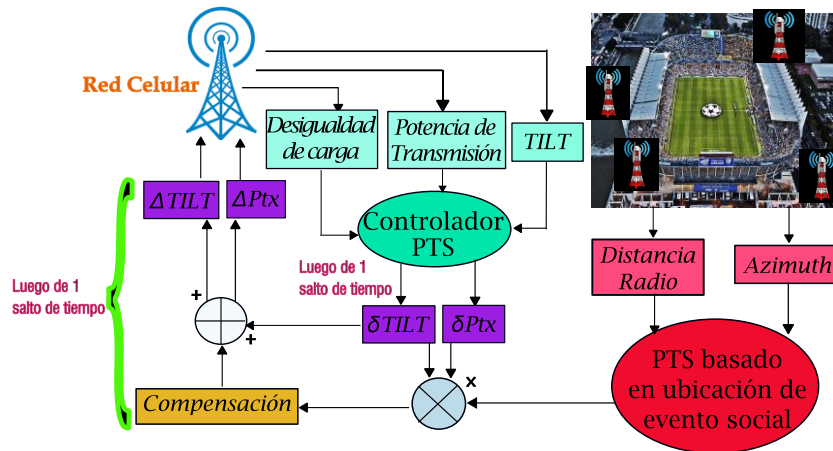


Nota. En la figura se puede ver la conformación del primer sistema de balanceo de carga que tendrá como parámetros de entrada la desigualdad de carga del sistema y el margen de traspaso (HOM) para su respectiva evaluación, *Sistema de balanceo de carga con parámetros de entrada: desigualdad de carga y HOM*, elaboración propia.

En cambio, en la **Figura 6** se encuentra el segundo sistema que se estará conformado de la misma manera que el anterior, con una diferencia del segundo parámetro de entrada del controlador de Potencia de Tráfico Compartido (PTS), pues este es intercambiado por dos nuevos parámetros: la potencia de transmisión (Ptx) y el ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base (TILT). Entonces, la etapa del controlador PTS tiene como datos de entrada a la desigualdad de carga que se da entre las celdas, la Ptx y el TILT, teniendo una variación de ángulo de inclinación ($\delta TILT$) a la salida la cual será sumada y se obtendrá otra variación de tilt ($\Delta TILT$) en la siguiente fase del bucle para la optimización del sistema en general.

Figura 6.

Sistema de balanceo de carga con parámetros de entrada: desigualdad de carga, Ptx y TILT



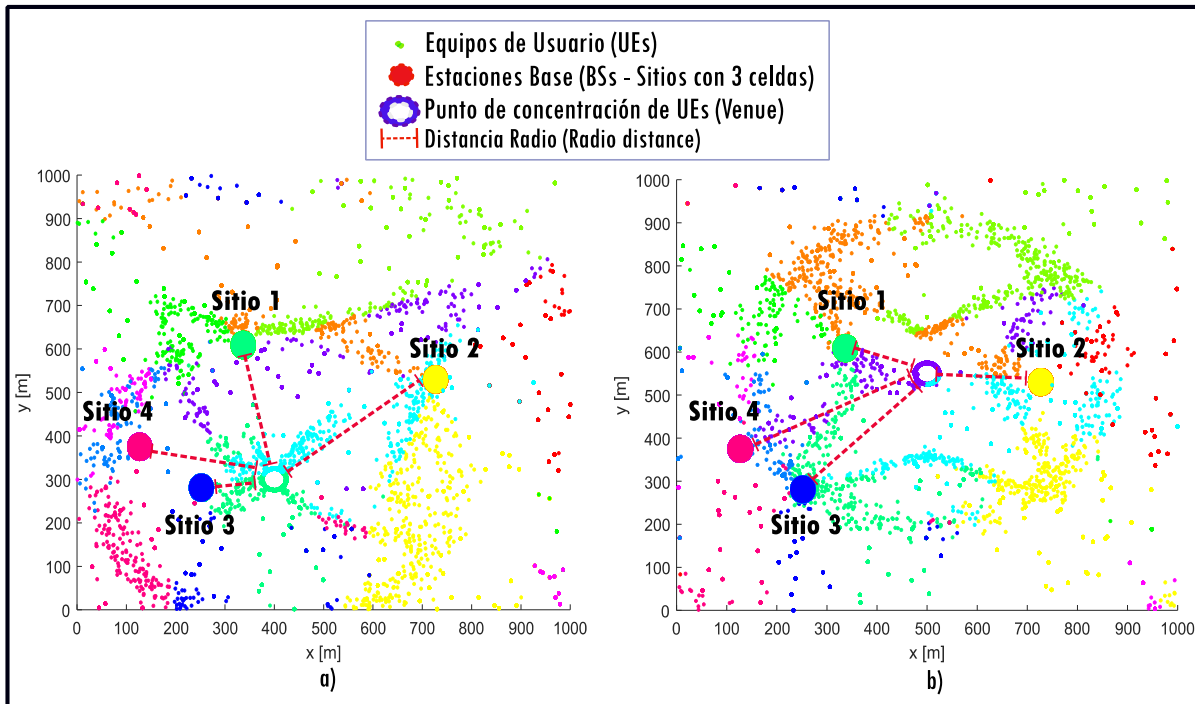
Nota. En la figura se puede ver la conformación del segundo sistema de balanceo de carga que tendrá como parámetros de entrada la desigualdad de carga, potencia de entrada y el ángulo de inclinación de las antenas de la estación base (TILT) para su respectiva evaluación, *Sistema de balanceo de carga con parámetros de entrada: desigualdad de carga, Ptx y TILT*, elaboración propia.

6. Resultados

A continuación, en la **Figura 7** se presentan los escenarios de simulación del evento, con el punto de ubicación del evento social (venue) considerando un punto en el centro y un punto en el borde del escenario para evaluar los sistemas de balanceo de carga que fueron diseñados previamente.

Figura 7.

Escenarios de simulación para el lugar del evento



Nota. Escenarios de simulación para el lugar del evento, con punto de concentración de UEs o venue. a) Punto de concentración de UEs en CENTRO [400,300] b) Punto de concentración de UEs en BORDE [500,550].

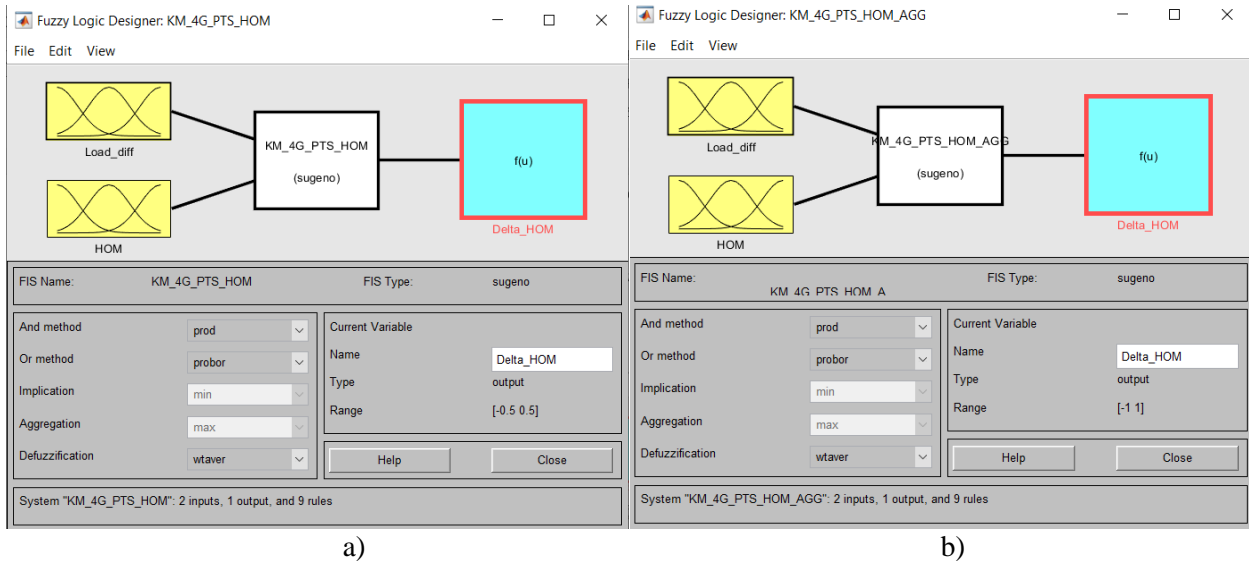
6.1. Controlador de lógica difusa basado en handover (*HOM*) para un escenario con tecnología móvil 4G LTE

En el desarrollo del controlador de lógica difusa para *HOM* se han desarrollado dos controladores en Matlab, un controlador con valores en la salida Δ_{HOM} que van de $[-0.5, 0.5]$, es decir, el mismo funciona con valores normales y óptimos y otro con valores agresivos que comprenden valores de $[-1, 1]$. De manera específica, los controladores son los mismos, lo único que variará es su salida y la respuesta en el funcionamiento total del sistema de balanceo de carga.

6.1.1. Controlador de lógica difusa de margen de traspaso con variación de [-6, 6] dB

Figura 8.

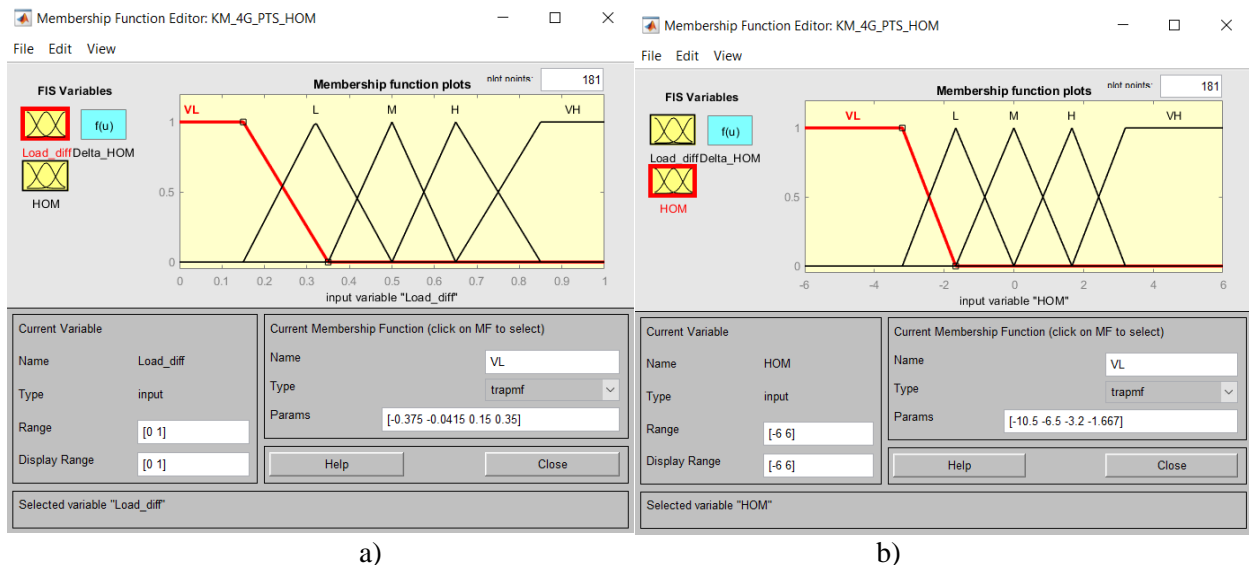
Controlador de lógica difusa Sugeno con 2 parámetros de entrada: Desigualdad de carga y Margen de traspaso o Handover (HOM)

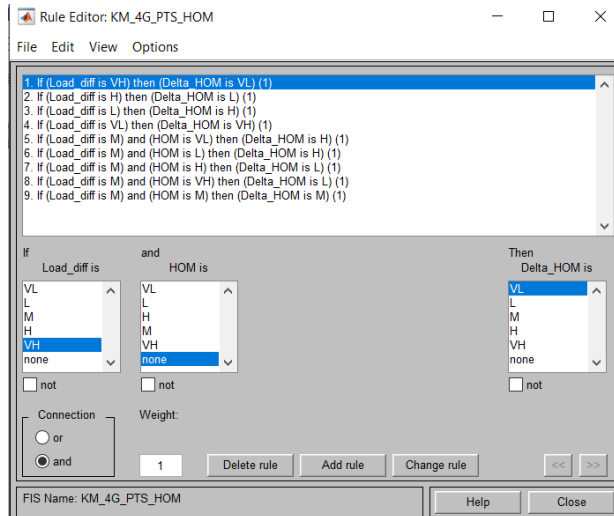


Nota. a) Asignación de funciones de membresía y variables lingüísticas con valores de [-0.5, 0.5] para la variable de salida variación de margen de traspaso (Delta_HOM). b) Asignación de funciones de membresía y variables lingüísticas con valores de [-1, 1] para la variable de salida variación de margen de traspaso (Delta_HOM) del sistema de interferencia difusa con cambios agresivos.

Figura 9.

Definición de funciones de membresía y variables lingüísticas de las variables del sistema de lógica difusa para HOM





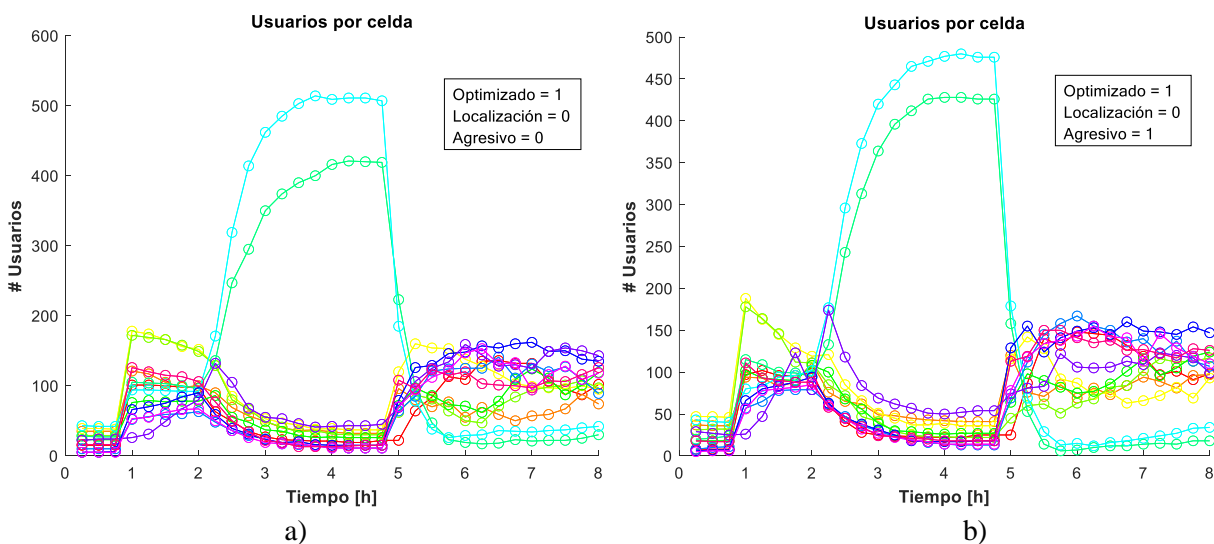
c)

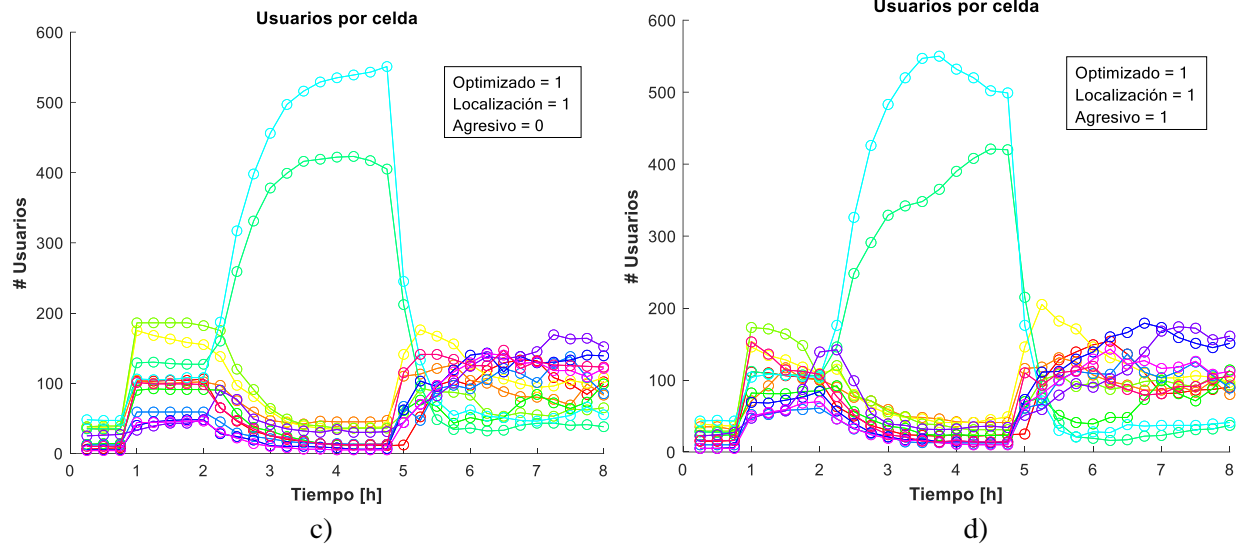
Nota. a) Funciones de membresía con variables lingüísticas con valores de [0,1] para expresar la desigualdad de carga para expresar la desigualdad de carga (Load_diff). b) Funciones de membresía con variables lingüísticas con valores de [-6,6] para expresar el margen de traspaso (HOM). c) Declaración de reglas entre las 2 variables de entrada, diferencia de carga (Load_diff) y margen de traspaso (HOM) y la variable de salida variación de margen de traspaso (Delta_HOM).

6.1.2. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para HOM con rango de [-6,6] dB con diferentes configuraciones sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el centro [370,390]

Figura 10.

Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas

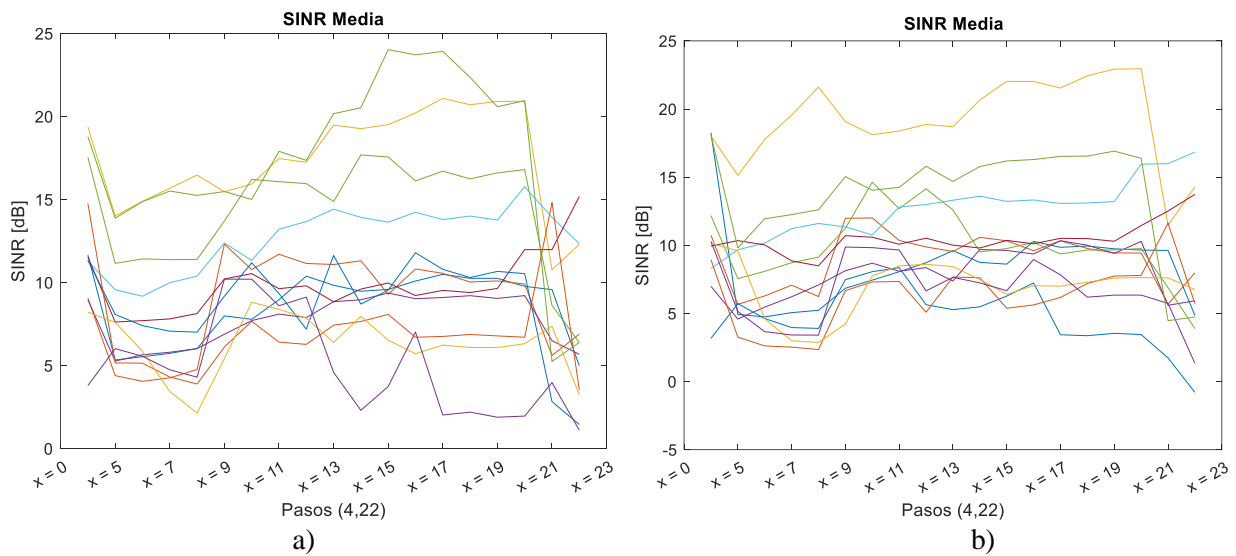


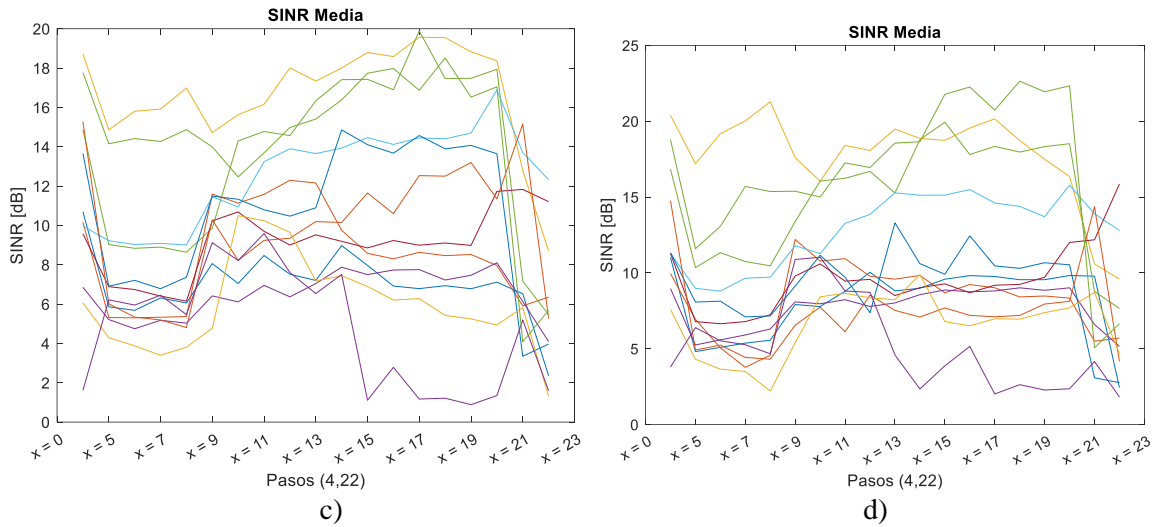


Nota. Número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

Figura 11.

Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa

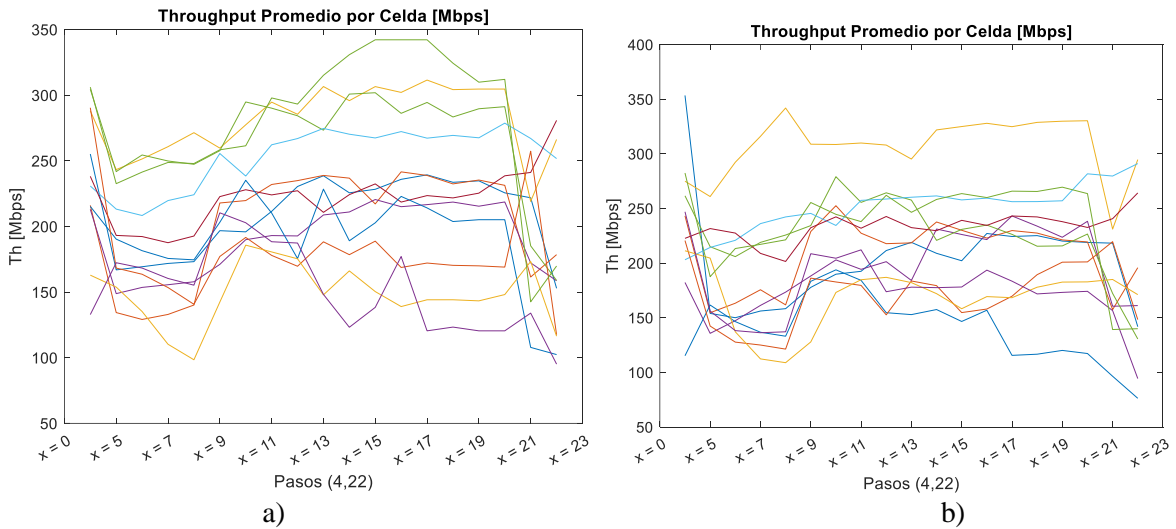


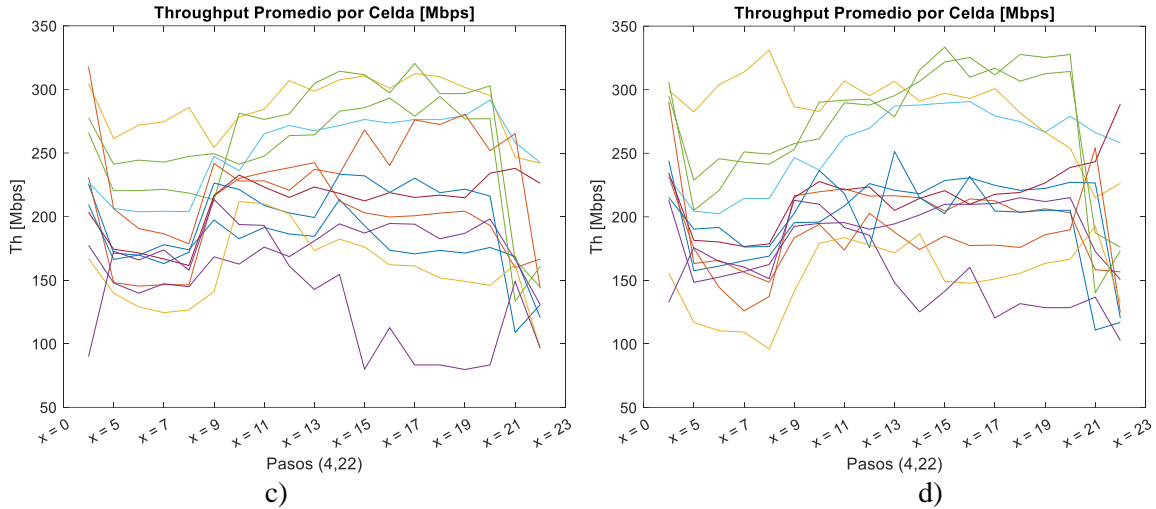


Nota. Media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

Figura 12.

Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa

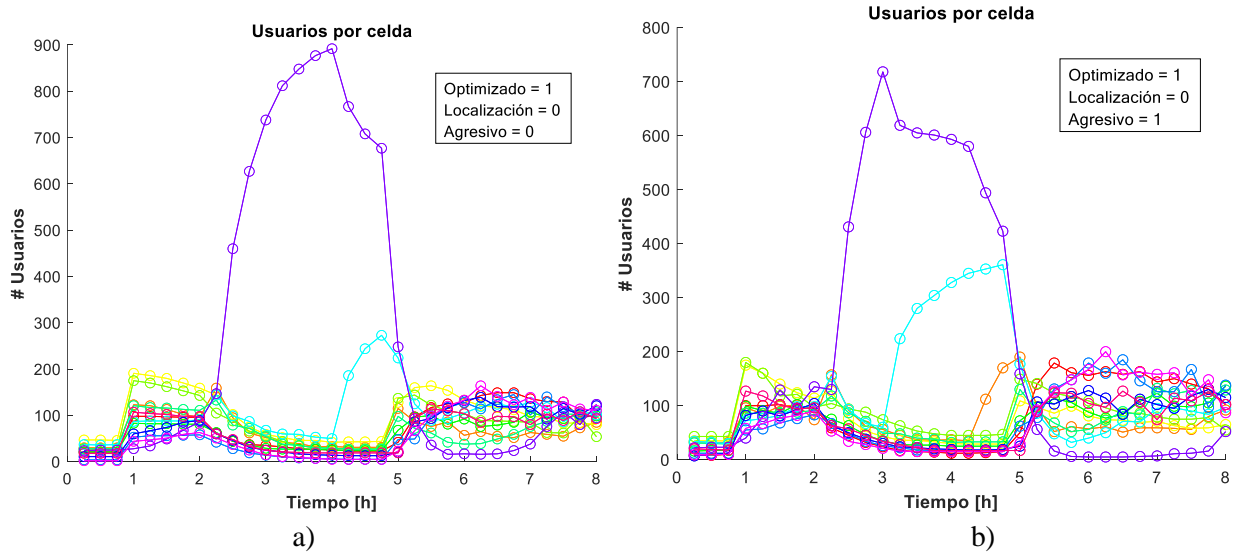


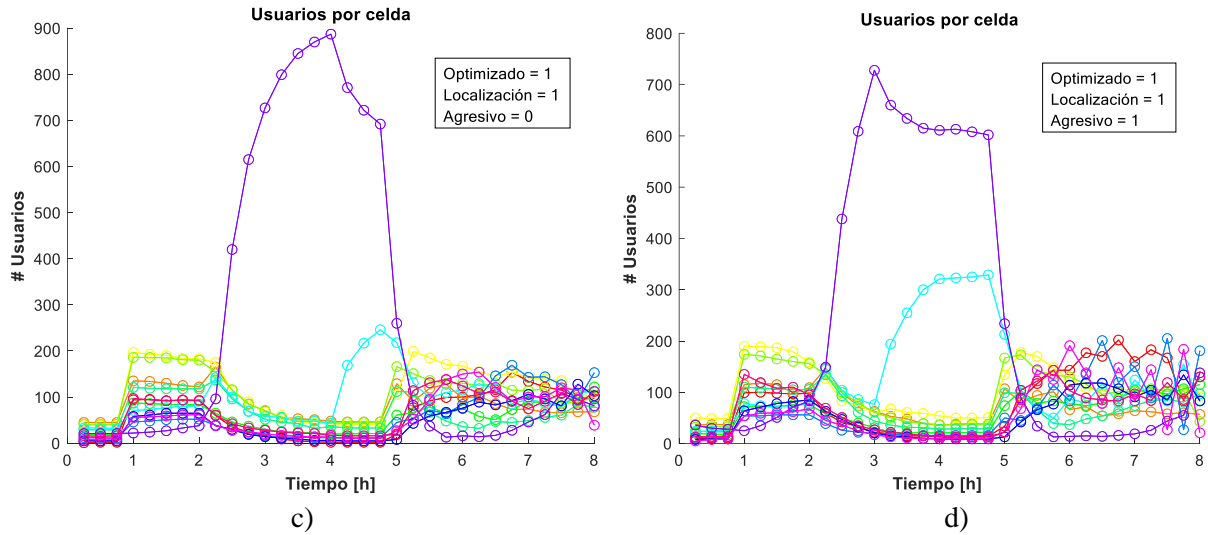


Nota. Tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

6.1.3. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para HOM con rango de [-6,6] dB con diferentes configuraciones sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el borde [500, 550]

Figura 13. Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas

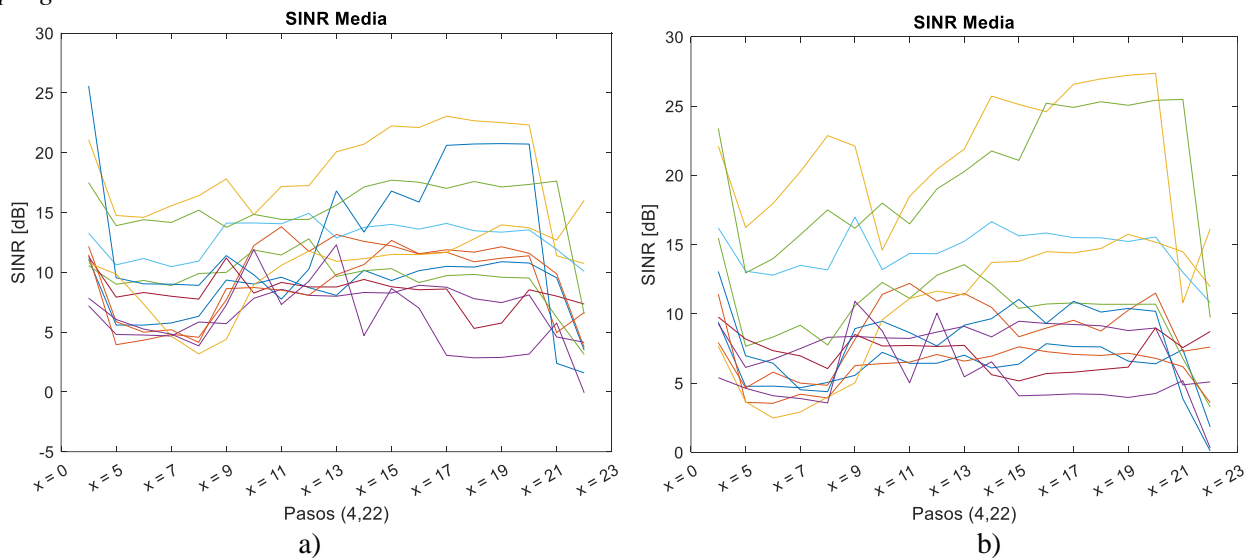


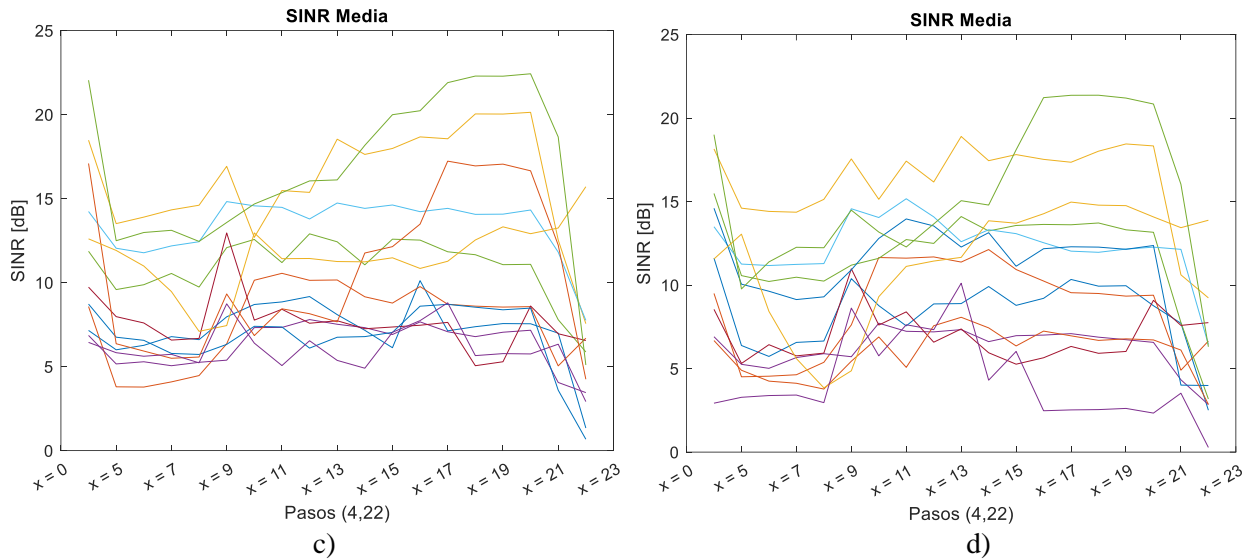


Nota. Número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

Figura 14.

Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa

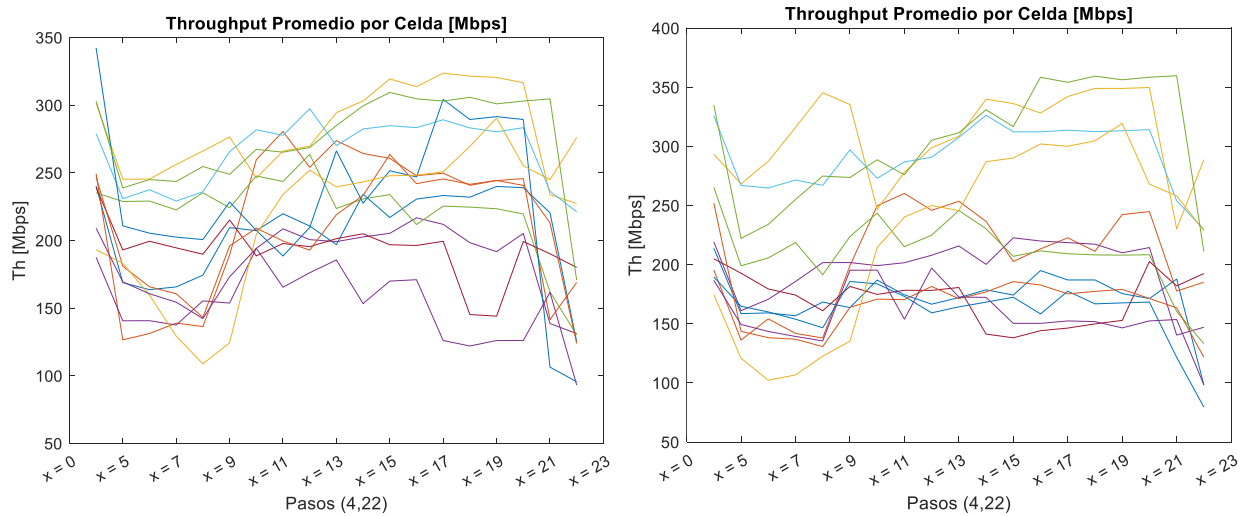


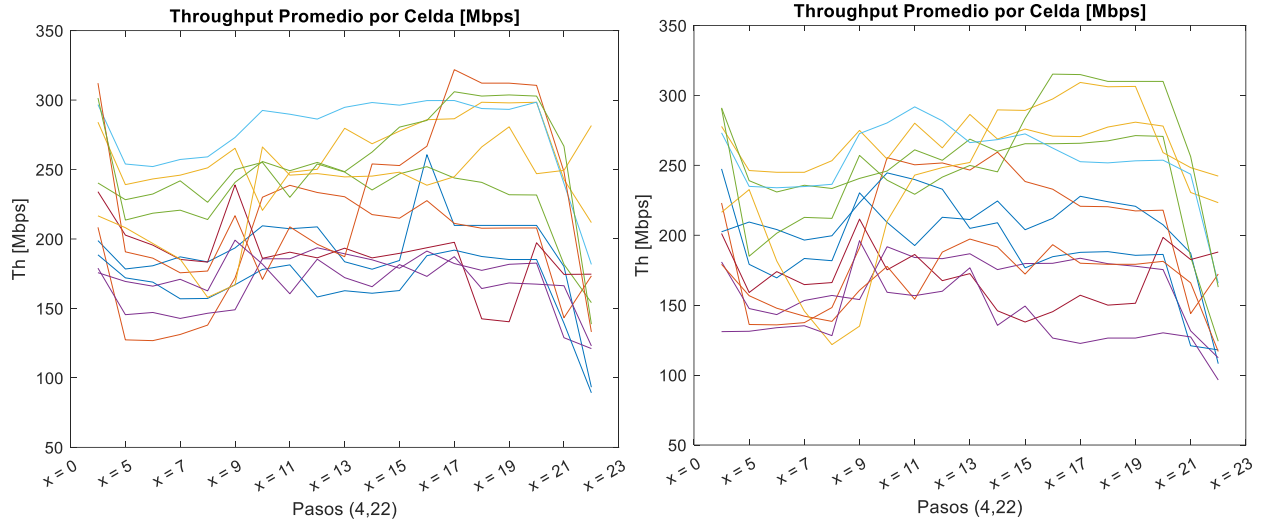


Nota. Media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

Figura 15.

Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa



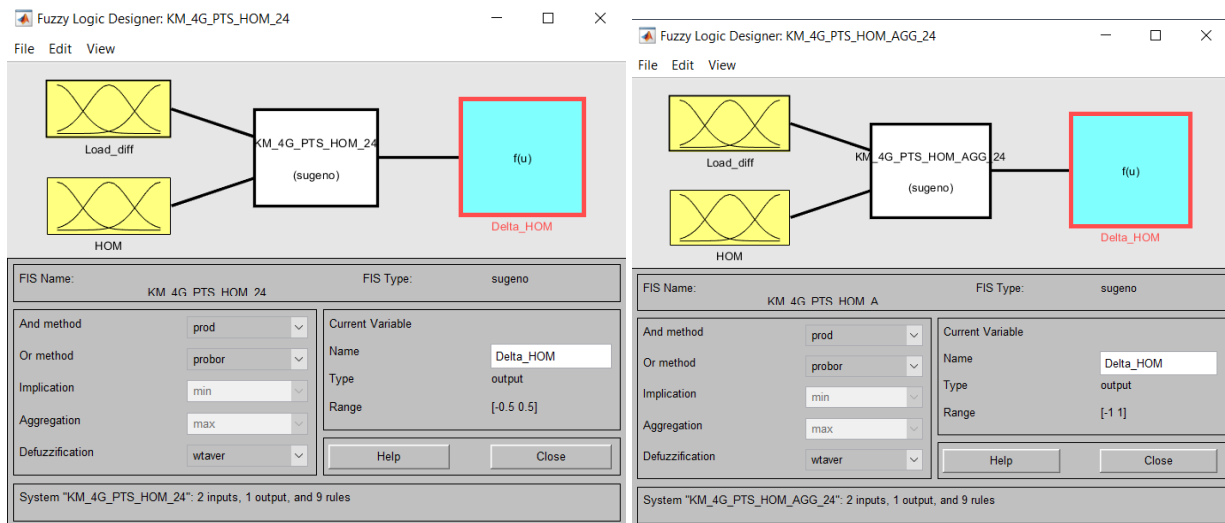


Nota. Tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

6.1.4. Controlador de lógica difusa de margen de traspaso (HOM) con variación de [-24, 24] dB con cambios normales de [-0.5,0.5] a la salida

Figura 16.

Controlador de lógica difusa Sugeno con 2 parámetros de entrada: Desigualdad de carga y Margen de traspaso o Handover (HOM)

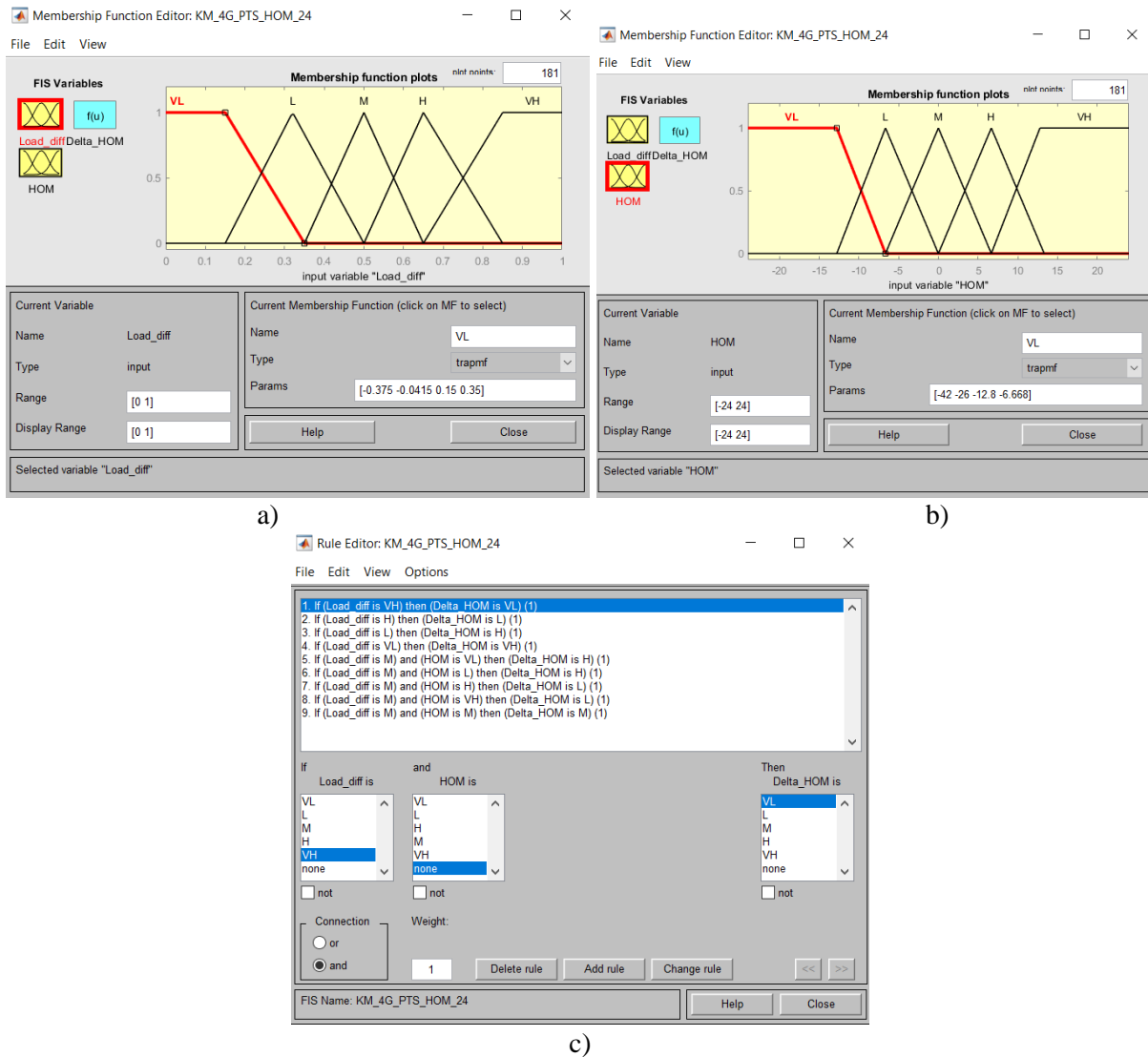


a)

b)

Nota. a) Asignación de funciones de membresía y variables lingüísticas con valores de [-0.5, 0.5] para la variable de salida variación de margen de traspaso (Delta_HOM). b) Asignación de funciones de membresía y variables lingüísticas con valores de [-1, 1] para la variable de salida variación de margen de traspaso (Delta_HOM) del sistema de interferencia difusa con cambios agresivos.

Figura 17.
Definición de funciones de membresía y variables lingüísticas de las variables del sistema de lógica difusa para HOM

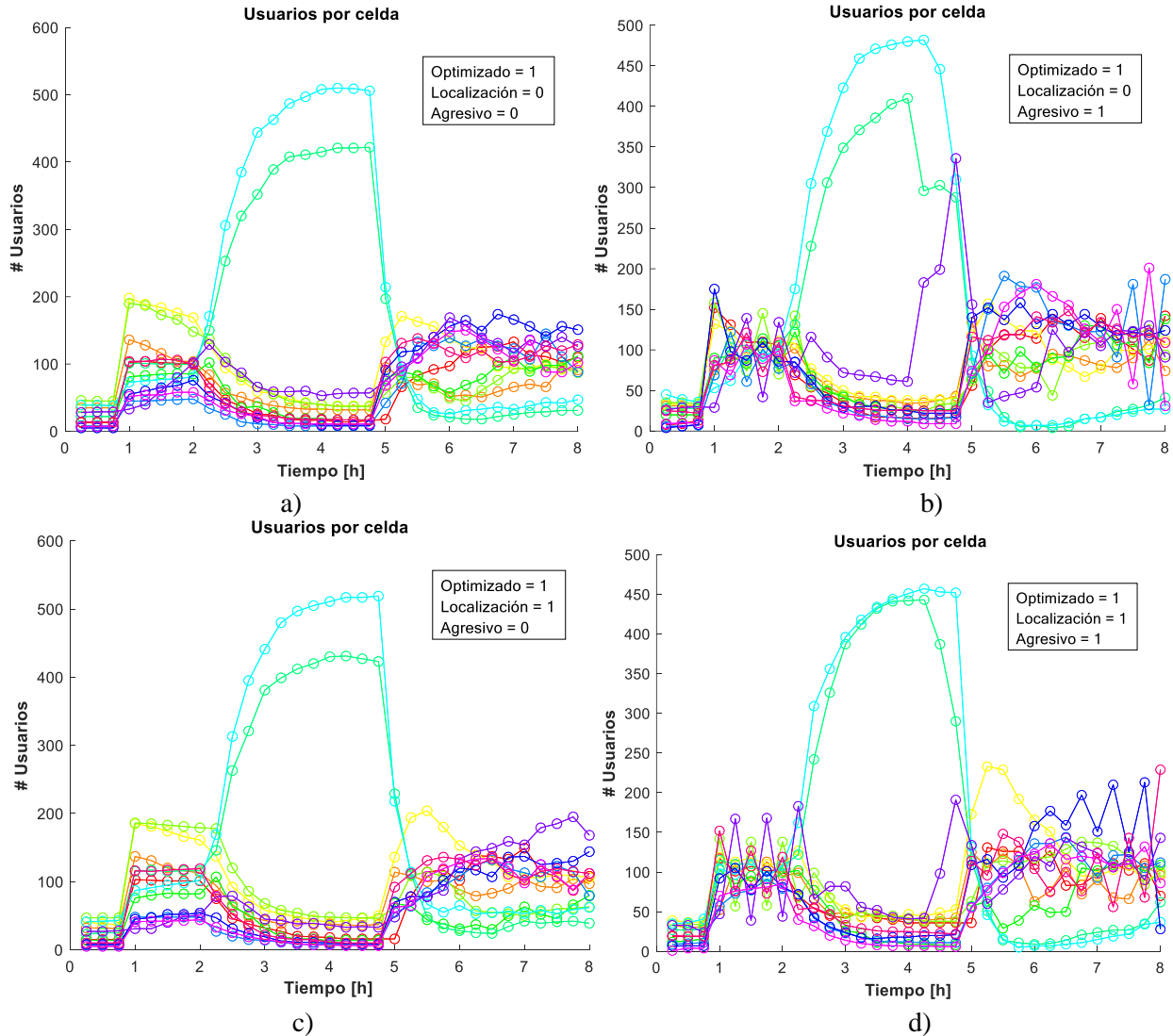


Nota. a) Funciones de membresía con variables lingüísticas con valores de [0,1] para expresar la desigualdad de carga para expresar la desigualdad de carga (Load_diff). b) Funciones de membresía con variables lingüísticas con valores de [-24,24] para expresar el margen de traspaso (HOM). c) Declaración de reglas entre las 2 variables de entrada, diferencia de carga (Load_diff) y margen de traspaso (HOM) y la variable de salida variación de margen de traspaso (Delta_HOM).

6.1.5. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para HOM con rango de [-24,24] dB con diferentes configuraciones sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el centro [370,390]

Figura 18.

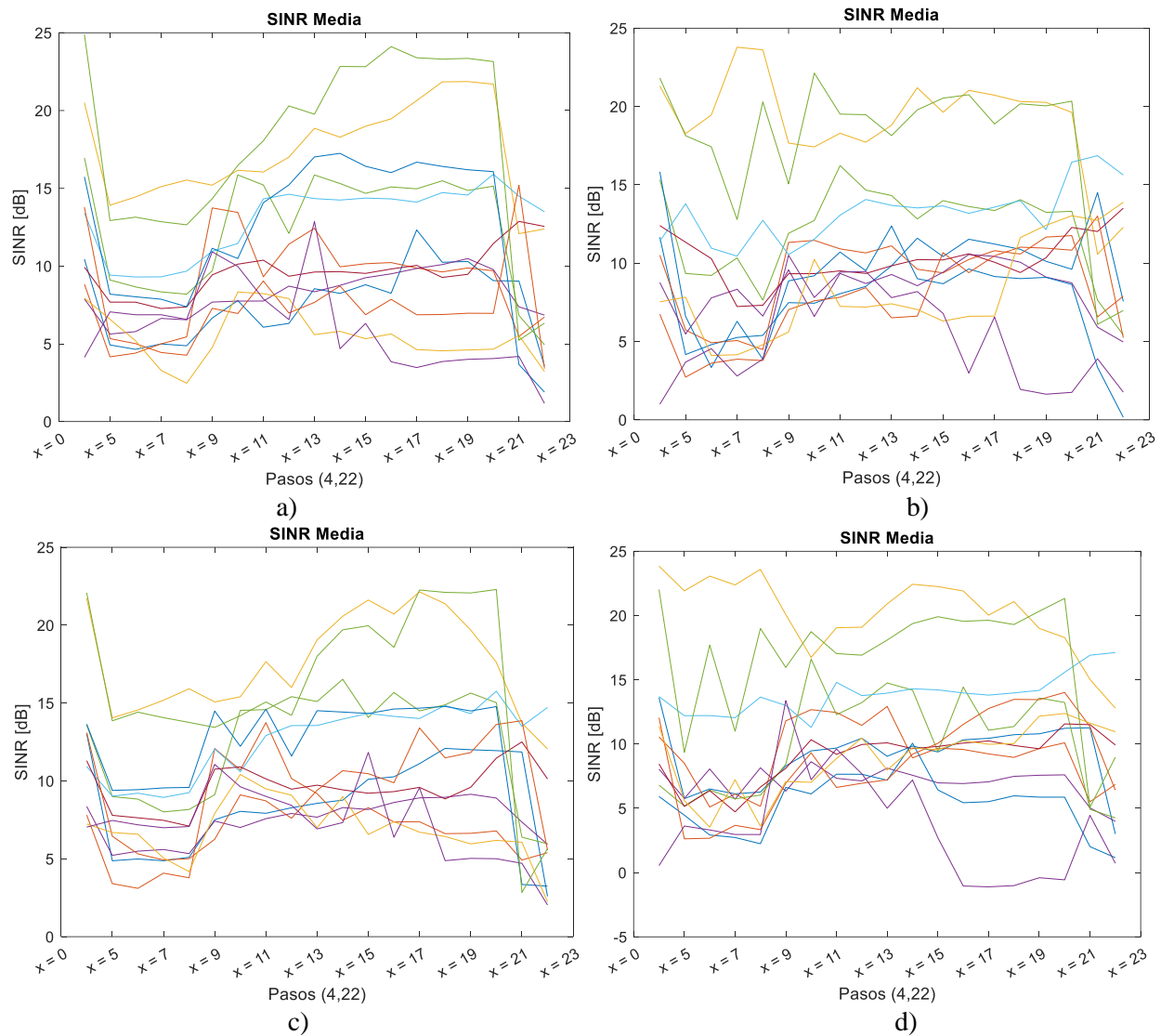
Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas



Nota. Número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

Figura 19.

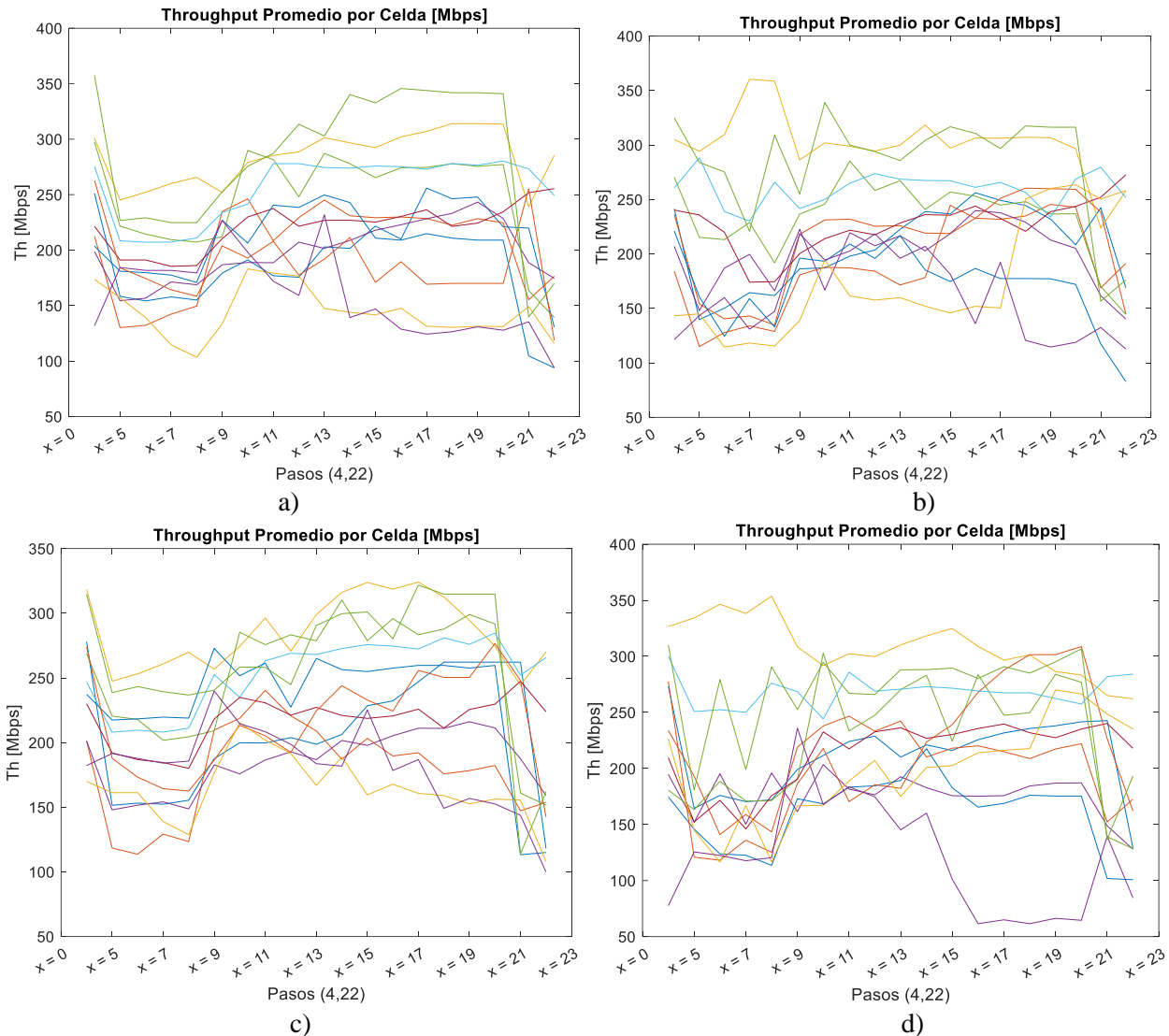
Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa



Nota. Media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

Figura 20.

Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa

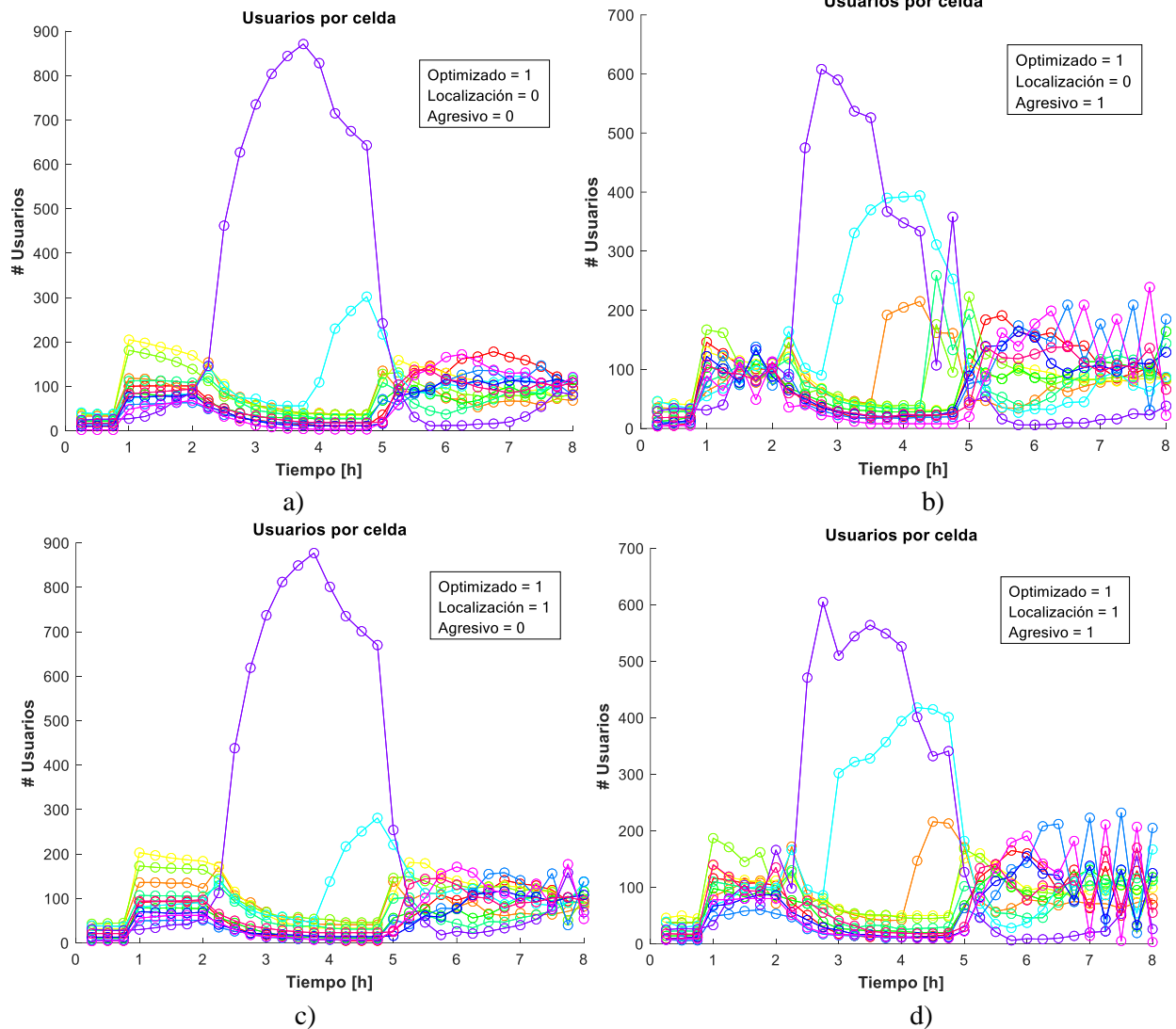


Nota. Tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

6.1.6. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para HOM con rango de [-24,24] dB con diferentes configuraciones sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el borde [500, 550]

Figura 21.

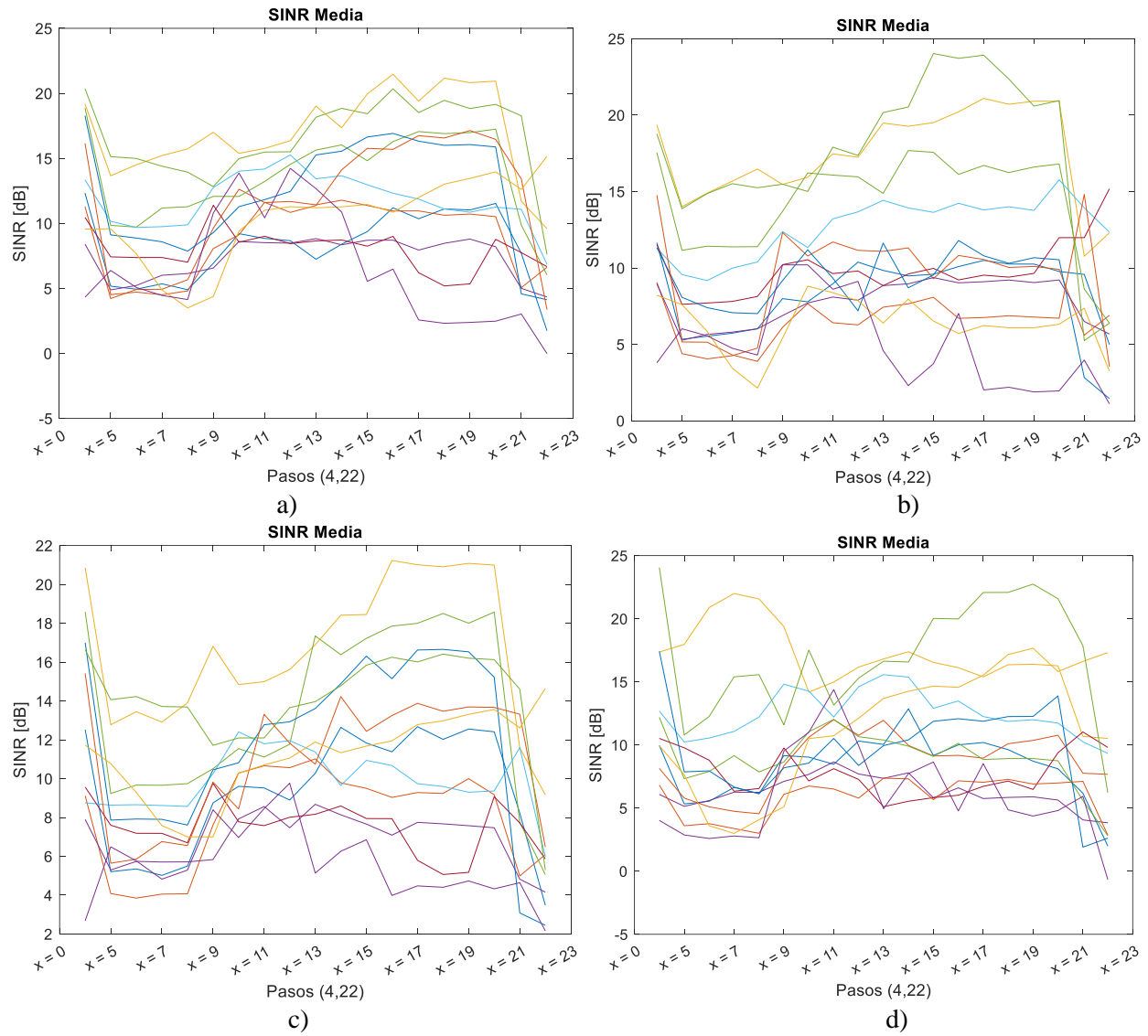
Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas



Nota. Número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

Figura 22.

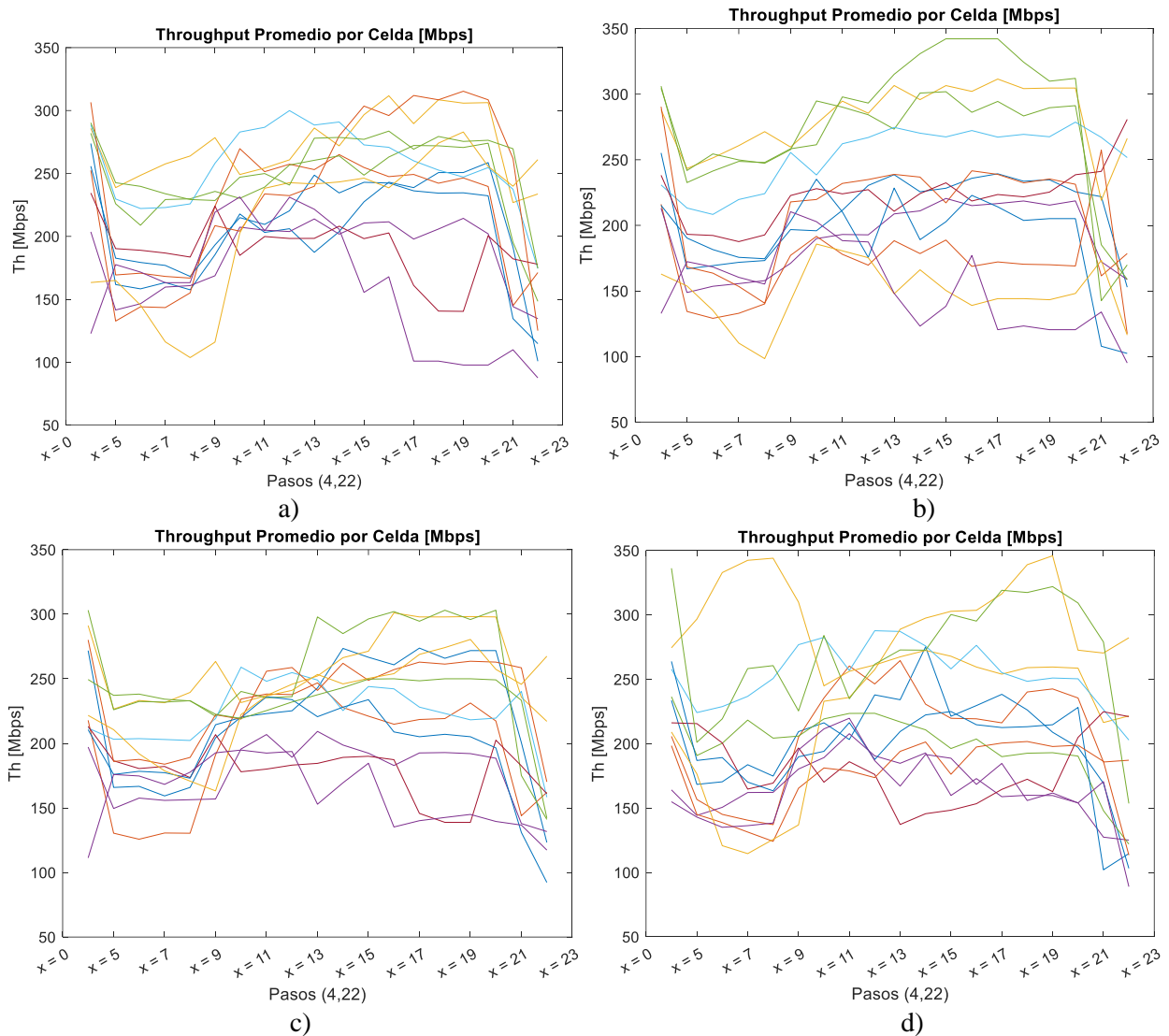
Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa



Nota. Media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

Figura 23.

Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa



Nota. Tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por (Torres et al., 2021).

6.2. Controlador de lógica difusa basado en el ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base para un escenario con tecnología móvil 4G LTE

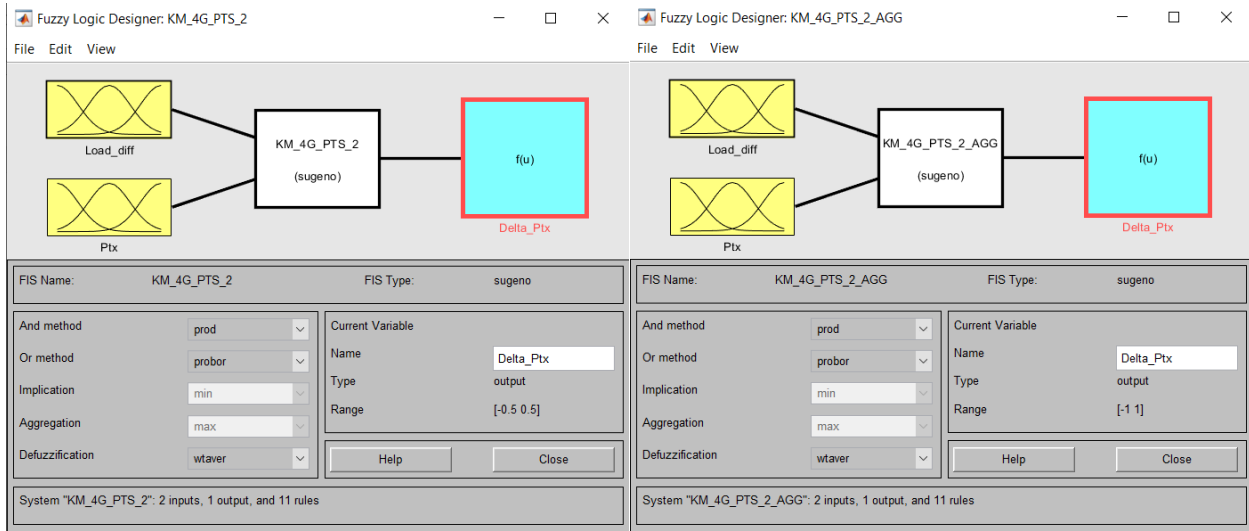
En el desarrollo del controlador de lógica difusa para TILT, también se han desarrollado cuatro controladores en Matlab, dos controladores con valores en la salida que van de $[-0.5, 0.5]$ que son valores normales y óptimos y otros dos con valores agresivos que comprenden valores de $[-1, 1]$. Para el caso con comportamiento agresivo, lo único que variará es su salida y la respuesta en el funcionamiento total del sistema de balanceo de carga. Además, se ha incluido una etapa donde se variará la potencia de transmisión de las antenas de las estaciones base y todos estos

controladores se aplican al mismo tiempo. Es decir, para la obtención del sistema de balanceo de carga basado en TILT se usarán 4 controladores para la simulación.

6.2.1. Controlador de lógica difusa basado la potencia de las antenas de las estaciones base con variación de [-25,5]dB

Figura 24.

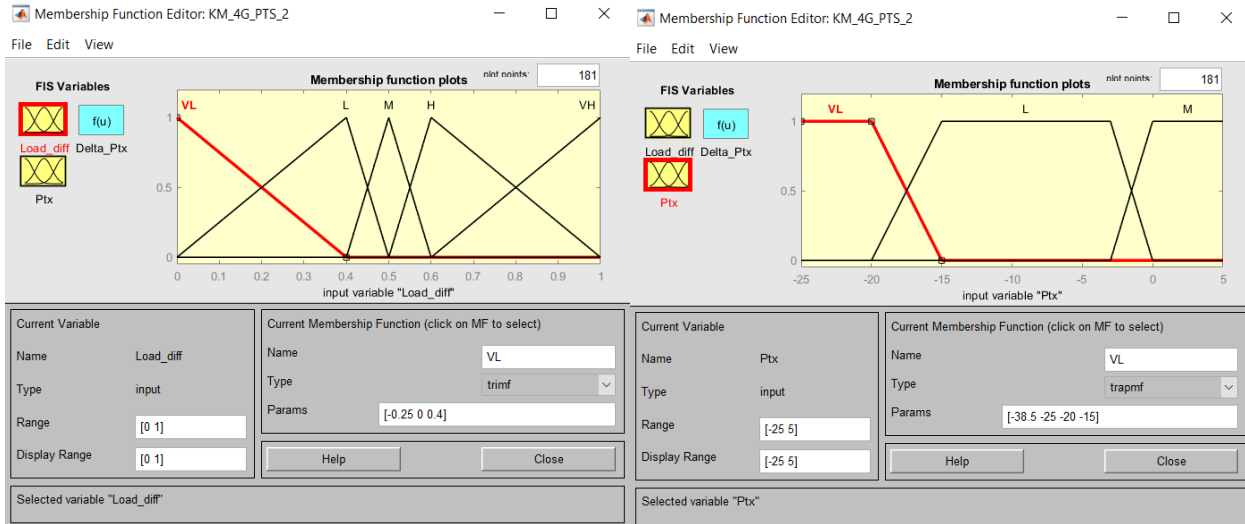
Controlador de lógica difusa Sugeno con 2 parámetros de entrada: Desigualdad de carga y Potencia de entrada (Ptx)



Nota. a) Asignación de funciones de membresía y variables lingüísticas con valores de [-0.5, 0.5] para la variable de salida variación de potencia de entrada (Delta_Ptx). b) Asignación de funciones de membresía y variables lingüísticas con valores de [-1, 1] para la variable de salida de potencia de entrada (Delta_Ptx) del sistema de interferencia difusa con cambios agresivos.

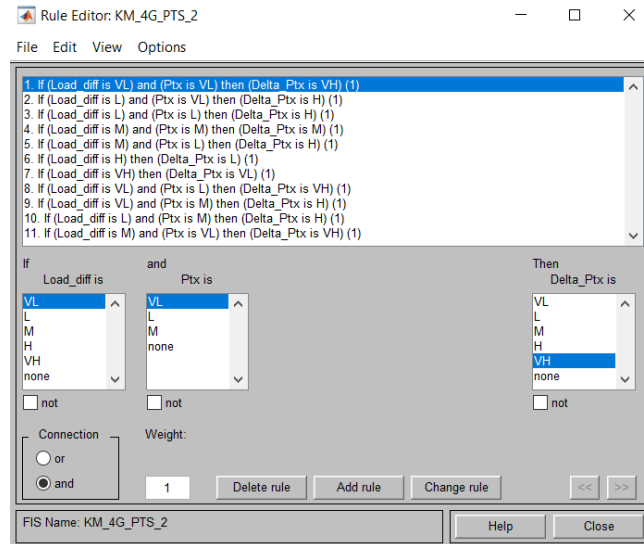
Figura 25.

Definición de funciones de membresía y variables lingüísticas de las variables del sistema de lógica difusa para Ptx



a)

b)



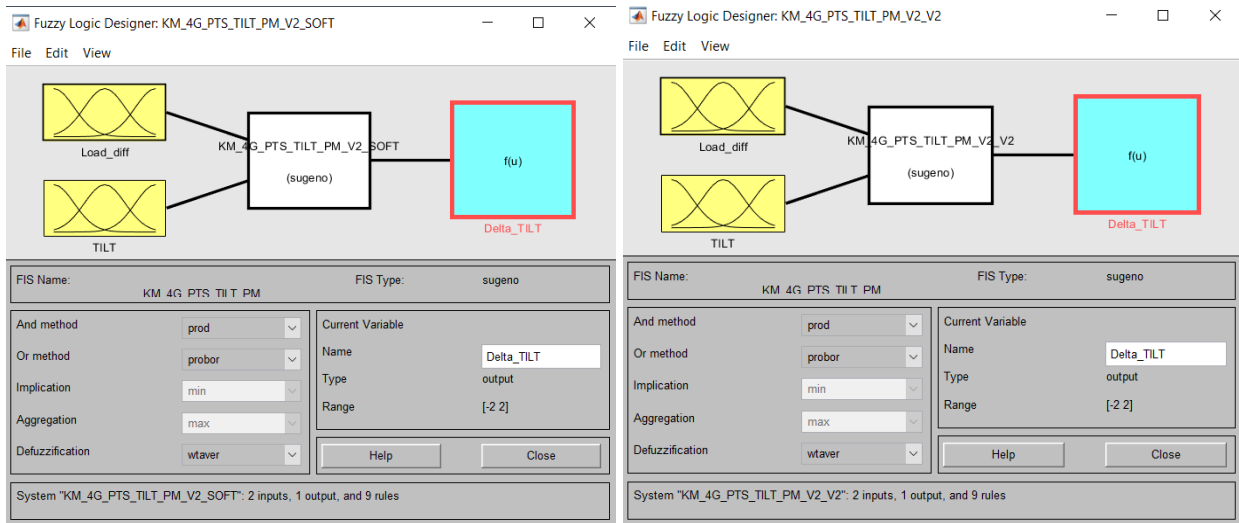
c)

Nota. a) Funciones de membresía con variables lingüísticas con valores de [0,1] para expresar la desigualdad de carga para expresar la desigualdad de carga (Load_diff). b) Funciones de membresía con variables lingüísticas con valores de [-25,5] para expresar la potencia de entrada (Ptx). c) Declaración de reglas entre las 2 variables de entrada, diferencia de carga (Load_diff) y potencia de entrada (Ptx) y la variable de salida variación de potencia de entrada (Delta_Ptx).

6.2.2. Controlador de lógica difusa basado en el ángulo de inclinación de las antenas ubicadas en las estaciones base con variación de $[0, 15]^\circ$ con cambios normales de $[-0.5, 0.5]$ a la salida

Figura 26.

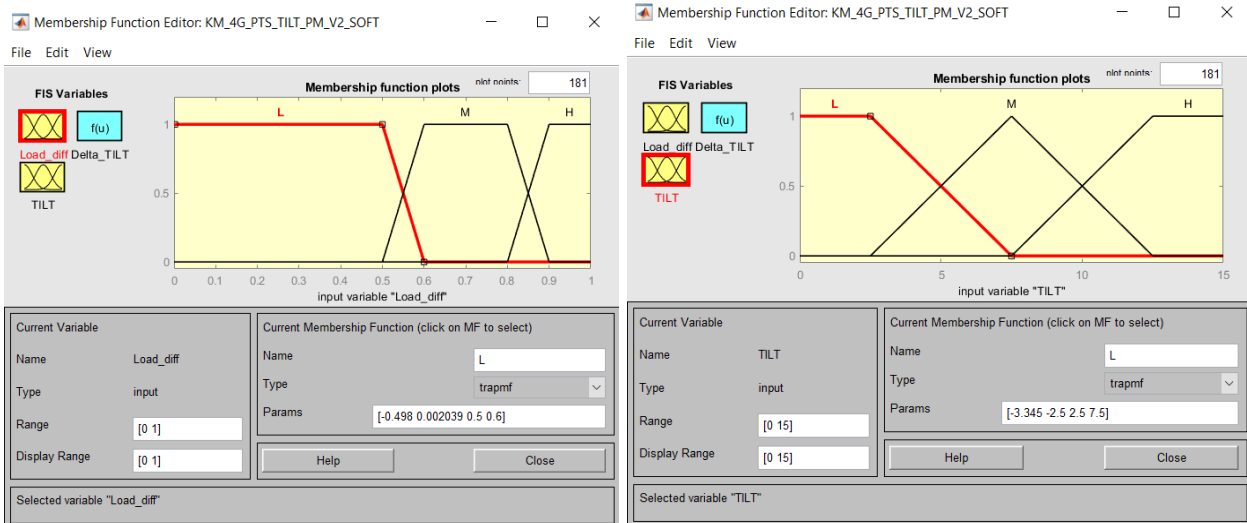
Controlador de lógica difusa Sugeno con 2 parámetros de entrada: Desigualdad de carga y Ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base (TILT)



Nota. a) Asignación de funciones de membresía y variables lingüísticas con valores de [-1, 1] para la variable de salida variación de ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base (Delta_TILT). b) Asignación de funciones de membresía y variables lingüísticas con valores de [-1, 1] para la variable de salida variación de ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base (Delta_TILT) del sistema de interferencia difusa con cambios agresivos.

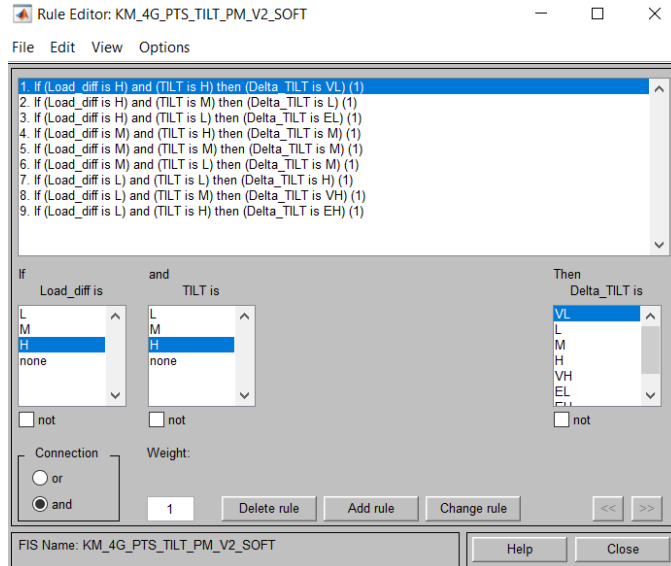
Figura 27.

Funciones de membresía con variables lingüísticas para expresar la desigualdad de carga (Load_diff)



a)

b)



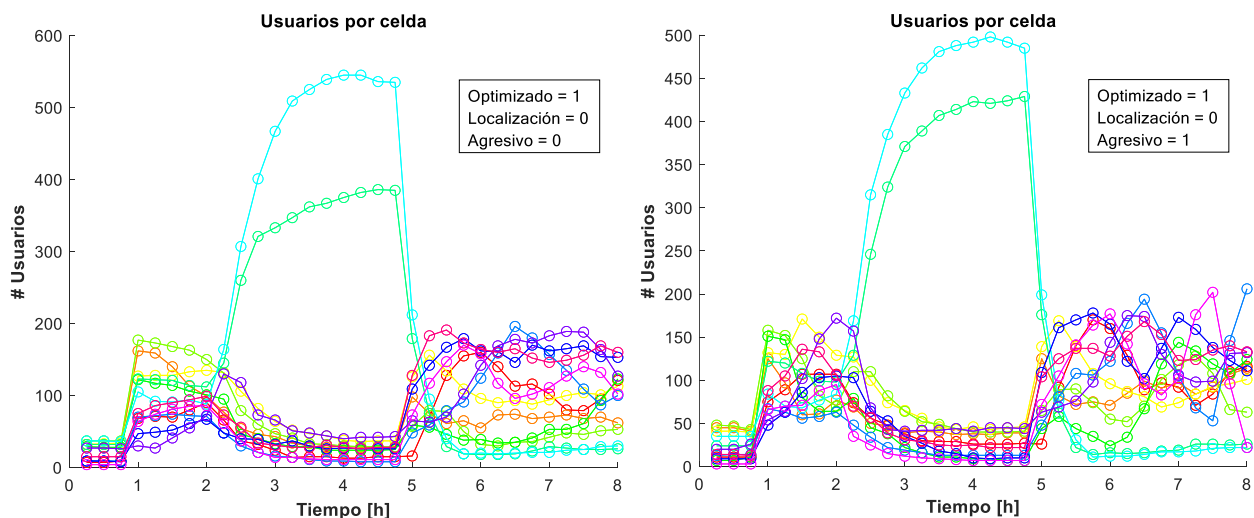
c)

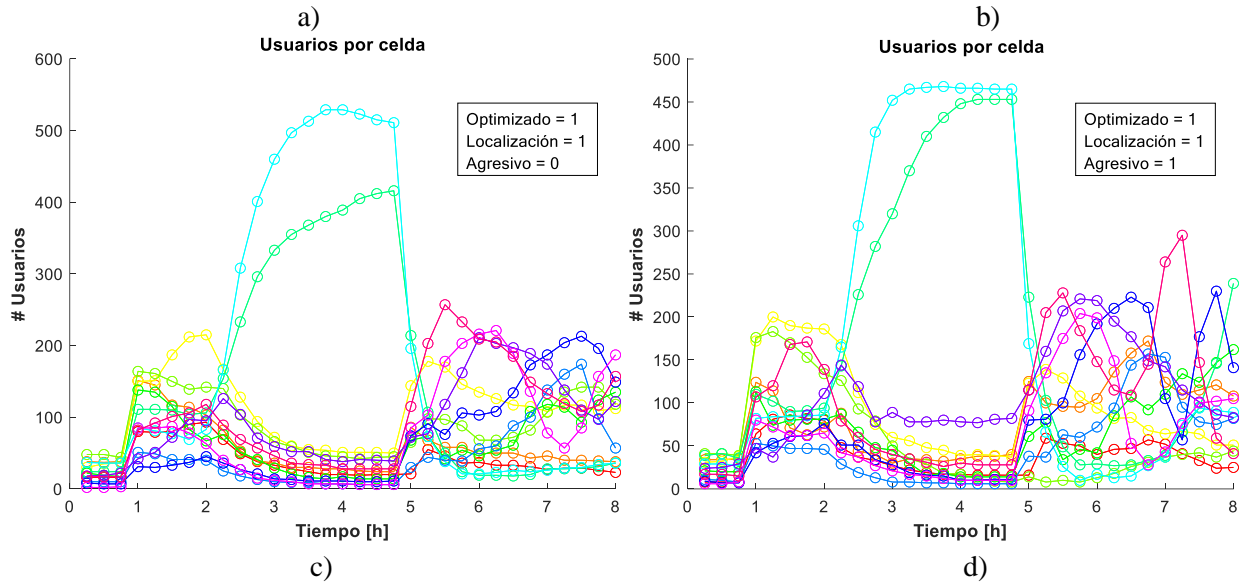
Nota. a) Funciones de membresía con variables lingüísticas con valores de $[0,1]$ para expresar la desigualdad de carga para expresar la desigualdad de carga (Load_diff). b) Funciones de membresía con variables lingüísticas con valores de $[0,15]$ para expresar el ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base (TILT). c) Declaración de reglas entre las 2 variables de entrada, diferencia de carga (Load_diff) y potencia de entrada (Ptx) y la variable de salida variación de ángulo de inclinación de las antenas de las estaciones base (Delta_TILT).

6.2.3. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para TILT con rango de $[0,15]^\circ$ con diferentes configuraciones sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el centro [370,390]

Figura 28.

Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas

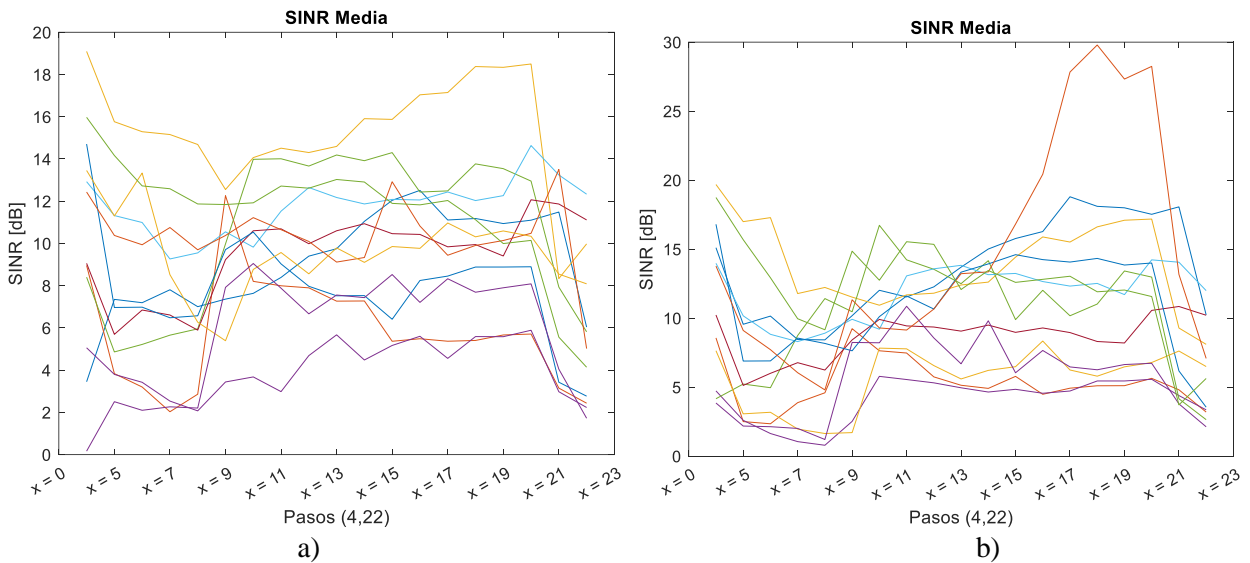


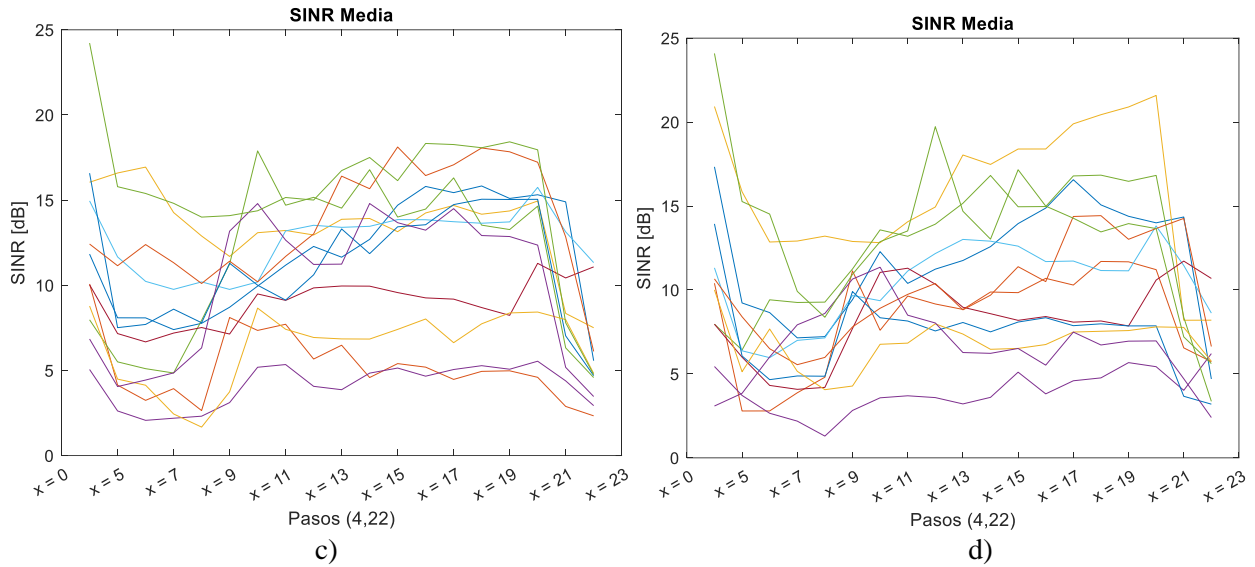


Nota. Número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

Figura 29.

Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa

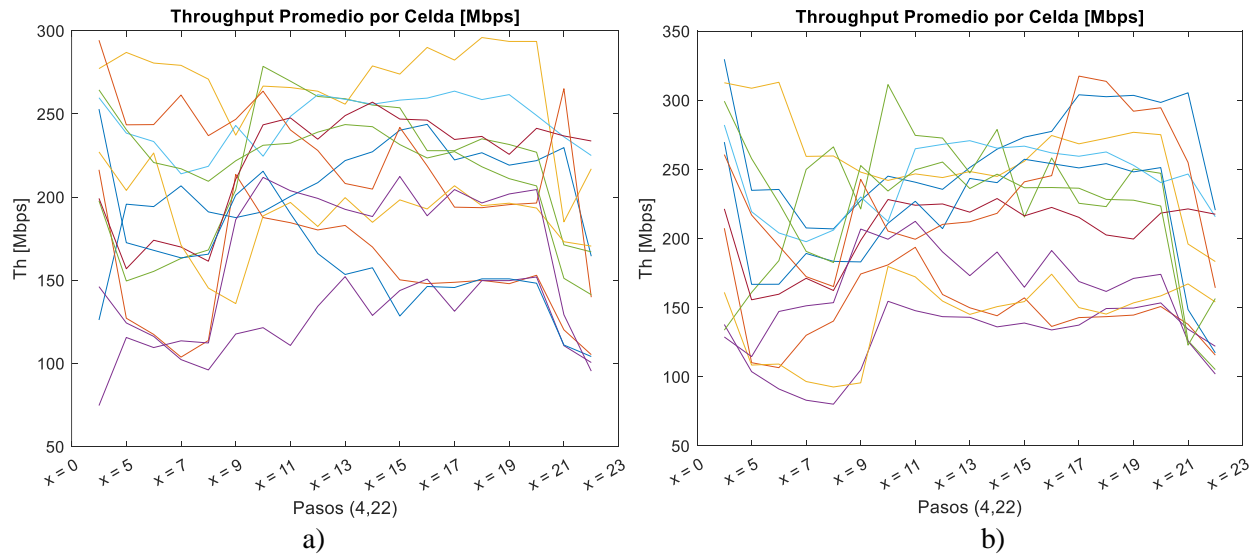


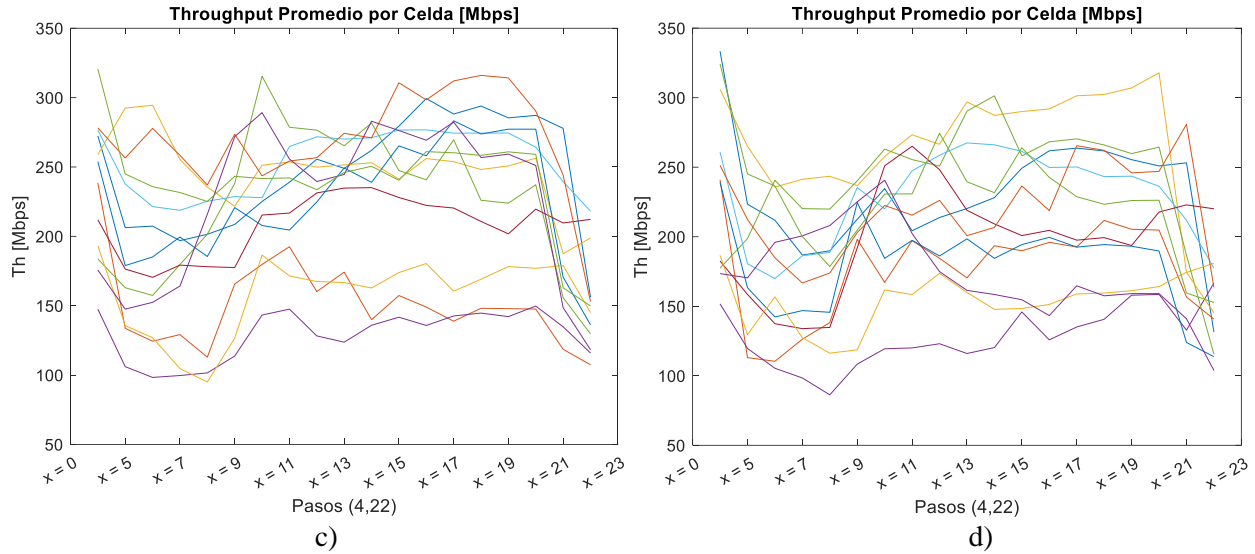


Nota. Media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

Figura 30.

Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa



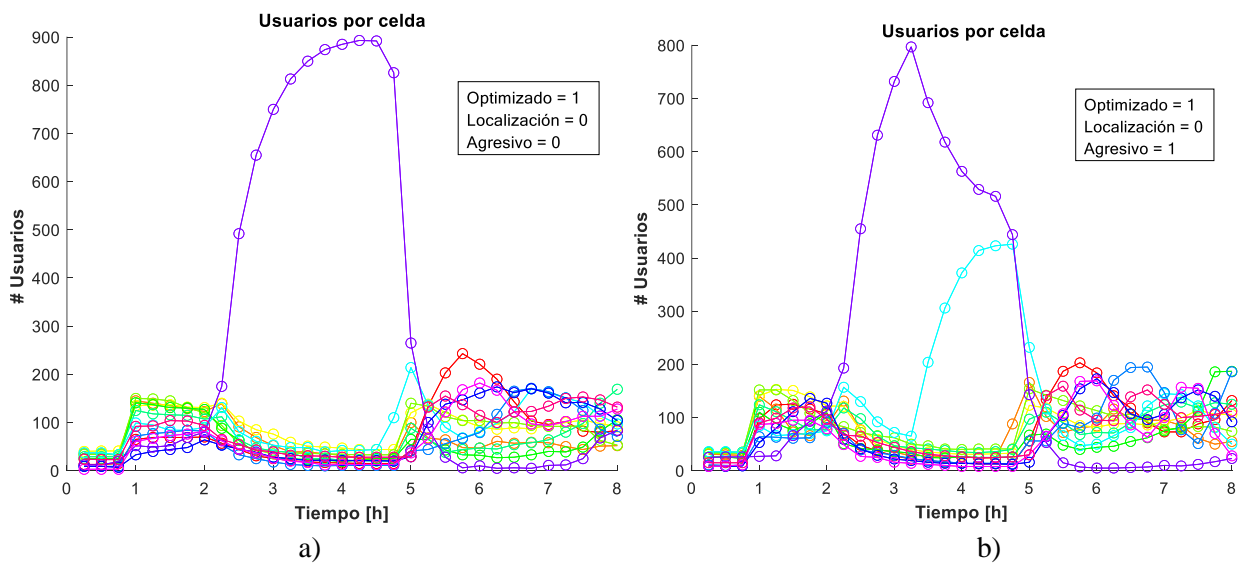


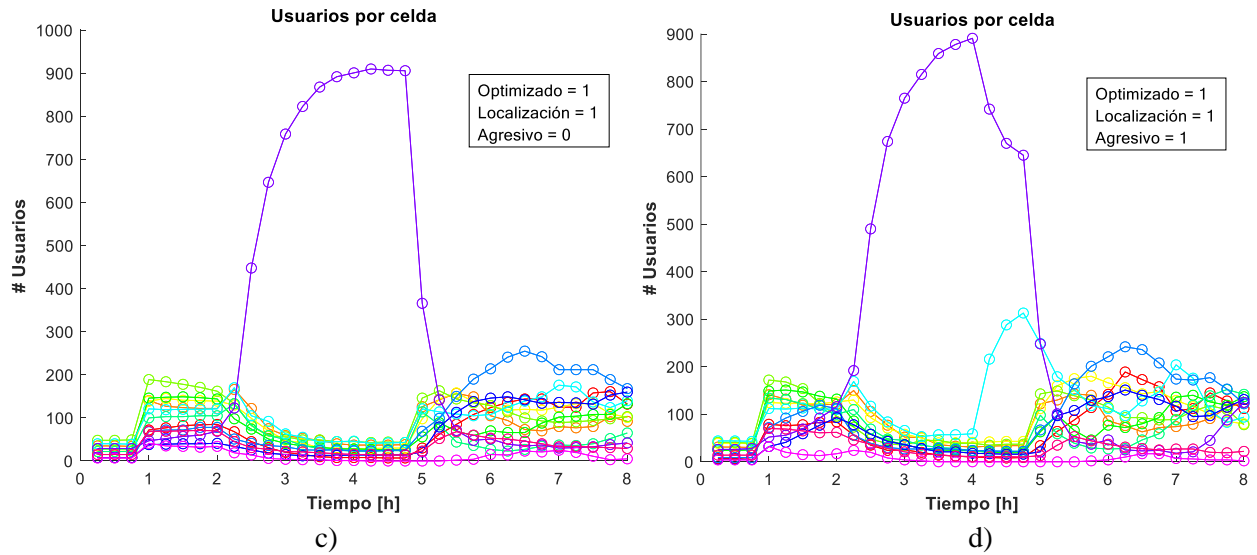
Nota. Tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

6.2.4. Gráficas obtenidas sobre el Número de Usuarios, SINR y Throughput al aplicar el controlador de lógica difusa para TILT con rango de $[0,15]^\circ$ con diferentes configuraciones sobre optimización, localización y cambio de datos de forma agresiva tomando como referencia un punto en el borde $[500, 550]$

Figura 31.

Gráfica del número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas

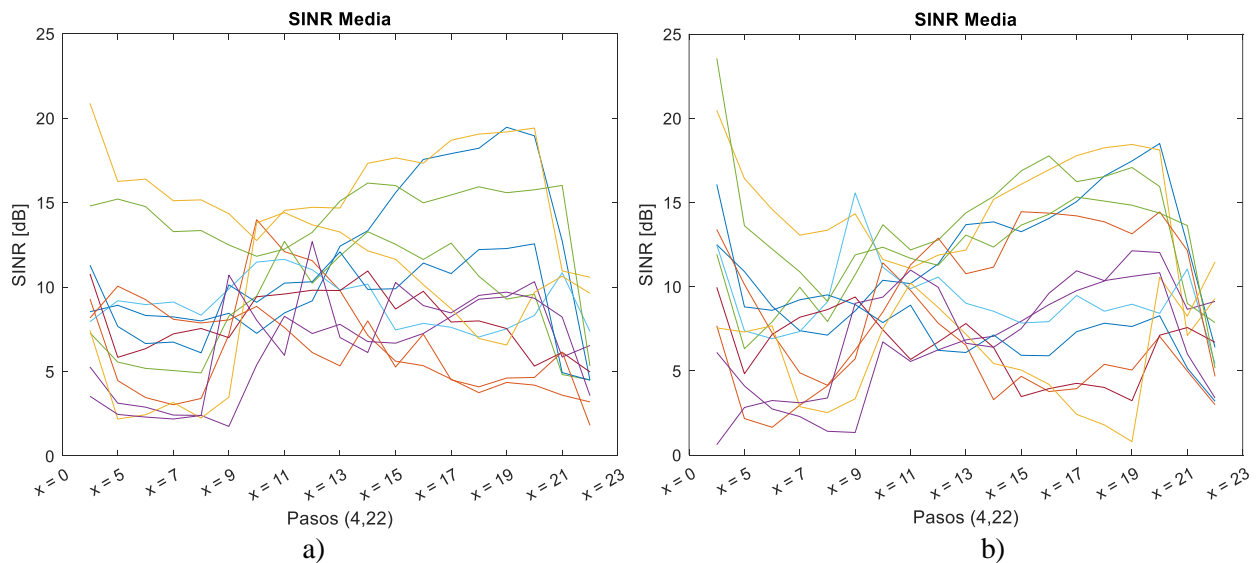


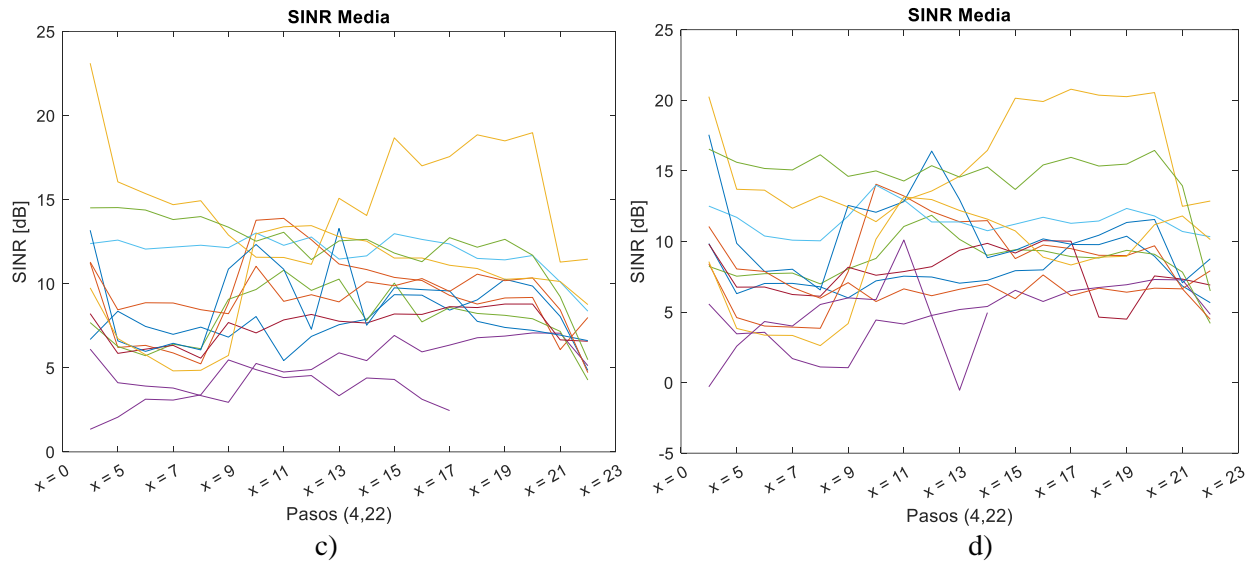


Nota. Número total de usuarios por cada celda de las 4 estaciones base con relación al tiempo en horas al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

Figura 32.

Gráfica de la media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa

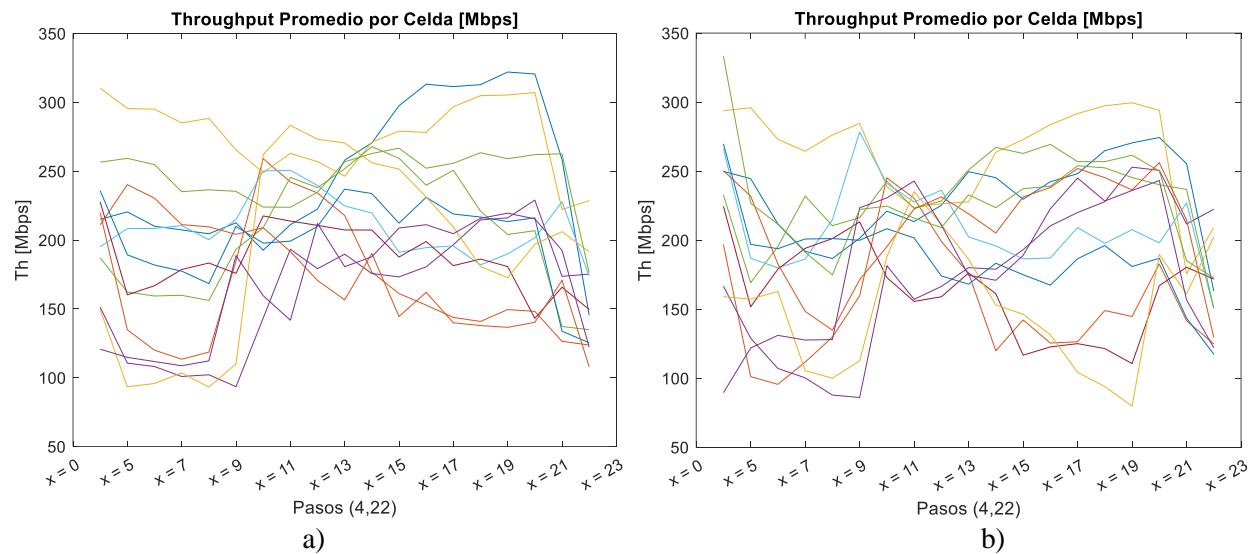


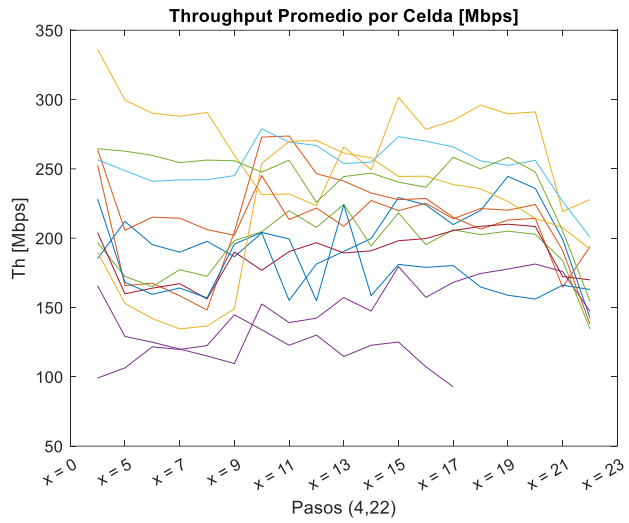


Nota. Media de la señal interferencia a ruido (SINR) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

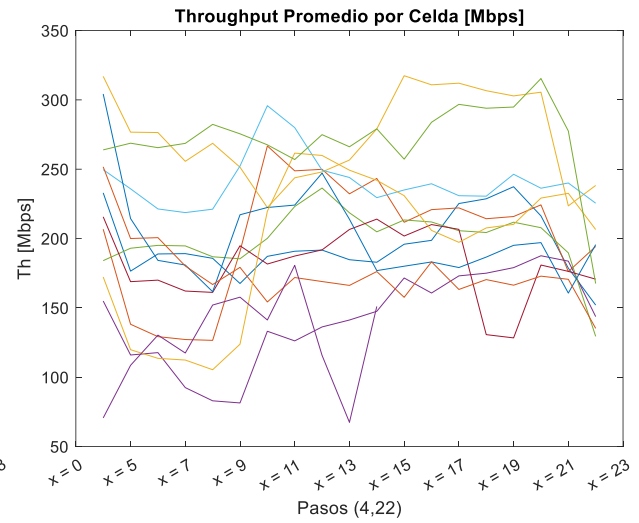
Figura 33.

Gráfica de la tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa





c)



d)

Nota. Tasa de transferencia promedio (Throughput) en los pasos 4 al 22 en la ejecución del programa al aplicar los métodos: a) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 0. b) Optimizado = 1, Localización = 0, Agresivo = 1. c) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 0. d) Optimizado = 1, Localización = 1, Agresivo = 1. Simulación realizada por Martínez (2023) en el software Matlab 2022b a partir del código creado por Torres et al. (2021).

7. Discusión

El trabajo de titulación fue desarrollado con el objetivo de evaluar y optimizar los parámetros de balanceo de carga en redes móviles, especialmente en situaciones de alta carga de red, para lograr un equilibrio más eficiente del número de usuarios por celda tomando en cuenta un contexto social.

La comparación del sistema de compensación de datos de la red con el sistema de compensación que incorpora datos sociales sobre la ubicación del lugar del evento ha arrojado valiosa información. Se ha observado a través de las simulaciones realizadas que cuando comienza un evento, hasta cierto momento de tiempo, una celda concreta experimenta la mayor carga, casi de forma exponencial. Entonces, como producto de la celda servidora cargada al máximo, las celdas adyacentes soportan una carga relativamente menor. Este patrón de distribución de la carga persiste hasta que concluye el evento y los usuarios se dispersan.

Posteriormente, para la evaluación de parámetros de optimización, en la evaluación del rendimiento del controlador de lógica difusa para margen de traspaso (HOM) en un punto en el centro del escenario y en el borde de este, los resultados evidencian que las respuestas del sistema en el centro son notablemente favorables en comparación con los del borde. Esto se debe principalmente al consistente margen de traspaso de usuarios cuando todas las estaciones base están sirviendo activamente a la red en ese punto central. Sin embargo, al considerar el punto en el borde, se hace evidente que la celda servidora soporta una carga considerable, aunque las celdas más cercanas ayudan a equilibrar la distribución de usuarios. Así, la incorporación del concepto de balanceo de carga basado en contexto o información social genera resultados superiores cuando todas las estaciones operan de forma concurrente.

Por otro lado, la evaluación del controlador de lógica difusa basado en cambios de potencia y el ángulo de inclinación de las antenas (TILT) de las estaciones base, revela ciertos resultados tomando los mismos puntos de referencia que el anterior sistema, es decir, un punto en el centro y otro en el borde para las distintas configuraciones que tendrá la simulación. La evaluación del parámetro Ptx y TILT demuestra que las respuestas obtenidas al analizar un punto de aglomeración de equipos de usuario en el centro son aceptables y similares a las obtenidas mediante la evaluación del controlador basado en HOM. Esto se debe a que el ángulo de inclinación de las antenas depende en gran medida del alcance que deben cubrir en relación con el evento, considerando que todas las

estaciones dan servicio simultáneamente a la red. Sin embargo, en un punto cercano al borde, la respuesta se vuelve más variable, ya que la distribución de usuarios entre celdas no se ha conseguido de forma óptima, pues, es evidente que existe una alta carga de usuarios en la red a pesar de aplicar el optimizador. En este escenario, la distancia radio juega un papel fundamental, ya que define el rango en el que el ángulo de inclinación de las antenas tendrá un impacto. Al encontrarnos en el borde, esta distancia tiende a ser considerablemente mayor, lo que se traduce en ángulos variables entre celdas debido a que no todas las estaciones estarán alimentando a la red por falta de cobertura.

Comprender la ubicación del evento, en particular el punto de aglomeración de los equipos de usuario, resulta ser un factor crucial para el balanceo de carga. Este conocimiento permite un ajuste más eficaz de parámetros como el HOM, la potencia de entrada, y el TILT. Teniendo en cuenta la ubicación de los UEs, los operadores pueden idear estrategias para optimizar la distribución de la carga, mitigar la congestión y mejorar el rendimiento de la red, garantizando en última instancia una mejor experiencia del usuario.

8. Conclusiones

- Se definió los parámetros de entrada del sistema de optimización de balanceo de carga basados en un contexto social. Al incorporar datos sociales sobre la ubicación del evento, se pudo observar una distribución más equitativa de la carga en las celdas, evitando sobrecargas y mejorando el rendimiento de la red.
- La selección del sistema de compensación de carga adecuado basado en sistemas de control fue un paso fundamental. El uso de un controlador de lógica difusa demostró ser eficiente para el balanceo de carga en redes móviles, especialmente en situaciones de alta carga de red. La implementación de este controlador permitió mantener un margen de traspaso de usuarios constante en el centro del escenario, evitando sobrecargas, aunque se observaron resultados variables en el borde debido a la falta de optimización en la distribución de usuarios.
- Se estableció el escenario y los parámetros de simulación en base a la tecnología de red móvil seleccionada. Esto permitió realizar evaluaciones y obtener información de mejora de los indicadores de rendimiento mediante gráficas de mérito. Los resultados de las simulaciones mostraron una distribución de carga más equilibrada y un mejor rendimiento de la red cuando se aplicó el sistema de balanceo de carga optimizado.
- La evaluación de los indicadores de rendimiento basados en gráficas de mérito indica que el HOM es el más efectivo para lograr una distribución óptima de la carga en redes móviles. Estos resultados respaldan la idea de que el uso de este indicador puede contribuir a la mejora de la calidad de servicio, mitigando la congestión y garantizando una mejor experiencia del usuario en entornos de alta carga de red.

9. Recomendaciones

- Se recomienda investigar y desarrollar métodos más precisos para recopilar y utilizar datos sociales sobre la ubicación del evento. Esto puede incluir el uso de tecnologías avanzadas, como el análisis de redes sociales y la geolocalización precisa, para obtener información más detallada sobre la concentración de usuarios en determinadas áreas. Esto permitirá una definición más precisa de los parámetros de entrada del sistema de optimización de balanceo de carga.
- A pesar de los buenos resultados obtenidos con uso de lógica difusa, se recomienda explorar otras técnicas de control, como el control predictivo o el control basado en aprendizaje automático. Estas técnicas pueden ofrecer enfoques alternativos y complementarios para mejorar el balanceo de carga en redes móviles y abordar los desafíos específicos relacionados con la distribución de usuarios en el borde.
- Para ampliar la validez de los resultados obtenidos, se recomienda realizar simulaciones y evaluaciones en diferentes escenarios de red móvil. Esto implica considerar distintas tecnologías, como 4G, 5G o futuras generaciones, y diferentes arquitecturas de red, como redes de células pequeñas o redes heterogéneas. Estas variaciones permitirán evaluar el desempeño del sistema de balanceo de carga en situaciones diversas y garantizar su aplicabilidad en entornos reales.
- Dado que el HOM ha demostrado ser efectivo en la optimización de la carga, se recomienda su implementación en las redes móviles existentes. Esto implica la configuración de controladores de lógica difusa basados en el HOM y la integración de los parámetros necesarios para su funcionamiento adecuado.

10. Bibliografía

- 3GPP. (2018). *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*. (TR 38.901 V15.0.0). https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/15.00.00_60/tr_138901v150000p.pdf
- Aboelwafa, M., Alsuqli, G., Banawan, K., & Seddik, K. G. (2022). *Self-optimization of cellular networks using deep reinforcement learning with hybrid action space*. 2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC).
- Abo Elsoud, A. M., & El-Nainay, O. M. (2015). *Performance Evaluation of Wireless Sensor Networks: A Survey*. *Journal of Communications*, 10(7), 419-430.
- Acharya, D., Lohani, D., & Han, H.-J. (2014). *PECSNET: The next generation pervasive and context aware social network*. 2014 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS).
- Aguilar-Garcia, A., Fortes, S., Fernandez Duran, A., & Barco, R. (2016). *Context-aware self-optimization: Evolution based on the use case of load balancing in small-cell networks*. *IEEE vehicular technology magazine*, 11(1), 86–95. <https://doi.org/10.1109/mvt.2015.2431753>
- Ahmed, T., Razzaq, M. A., & Choi, J. (2016). *A Survey on Network Throughput Evaluation Metrics for Heterogeneous Wireless Networks*. *Wireless Personal Communications*, 89(2), 619-652.
- Akpado, K., Oguejiofor, O., Ezeagwu, C., & Okolibe, A. (2013). *Investigating the Impacts of Base Station Antenna Height, Tilt and Transmitter Power on Network Coverage*. 32–38.
- Al Agha, K., Pujolle, G., & Yahiha, T. A. (2016). *Mobile and Wireless Networks*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons.

- Ardi, Y., Effendi, S., & Nababan, E. B. (2021). *Mamdani and Sugeno fuzzy performance analysis on rainfall prediction*. *Randwick International of Social Science Journal*, 2(2), 176–192. <https://doi.org/10.47175/rissj.v2i2.240>
- Awad, N., & Mkwawa, I.-H. (2017). *The impact of the reference signal received power to quality of experience for video streaming over LTE network*. 2017 Annual Conference on New Trends in Information & Communications Technology Applications (NTICT).
- Becvar, Z., Mach, P., Pravda, I. (2014). *Mobile Networks* (1era Edición). https://techpedia.fel.cvut.cz/project/modules/improvet/download/C4EN/Mobile_networks.pdf
- Boldrini, C., Conti, M., Delmastro, F., & Passarella, A. (2010). *Context- and social-aware middleware for opportunistic networks*. *Journal of Network and Computer Applications*, 33(5), 525–541. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2010.03.017>
- CableFree. (2016). *LTE RSRQ to SINR*. [cablefree.net. https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-rsrq-sinr/](https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-rsrq-sinr/)
- Datta, S., & Banerjee, M. K. (2005). *Fuzzy modeling of strength–composition–process parameter relationships of HSLA steels*. *Materials and manufacturing processes*, 20(5), 761–776. <https://doi.org/10.1081/amp-200055136>
- De, S., & Moessner, K. (2009). *A framework for mobile, context-aware applications*. 2009 International Conference on Telecommunications.
- Dike, H. U., Zhou, Y., Deveerasetty, K. K., & Wu, Q. (2018). *Unsupervised learning based on artificial neural network: A review*. In 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS) (pp. 322-327). IEEE.
- Ding, A. Y., & Janssen, M. (2018). *Opportunities for applications using 5G networks: Requirements, challenges, and outlook*. In Proceedings of the Seventh International Conference on Telecommunications and Remote Sensing (pp. 27-34).

- Fallaha, S., Breijieh, A., & Dweikat, A. (2019). *4G LTE Handover Parameter Optimization Using Machine Learning Techniques*.
- Fang, R., Chuai, G., & Gao, W. (2020). *Improve quality of experience of users by optimizing handover parameters in mobile networks*. Proceedings of the 4th International Conference on Computer Science and Application Engineering.
- Forouzan, B. A., & Fegan, S. C. (2012). *Data Communications and Networking*. McGraw-Hill.
- François-Lavet, V., Henderson, P., Islam, R., Bellemare, M. G., & Pineau, J. (2018). *An introduction to deep reinforcement learning*. Foundations and Trends® in Machine Learning, 11(3–4), 219–354. <https://doi.org/10.1561/22000000071>
- Gaber, A., Zaki, M. M., Mohamed, A. M., & Beshara, M. A. (2019). *Cellular network power control optimization using unsupervised machine learnings*. 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE).
- Gao, F., & Tao, M. (2009). *Load Balancing in Cellular Networks: A Survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 11(4), 56-70.
- Garg, V. K., Wilkes, J., Ray, S., & Stüber, G. L. (2005). *Wireless Communications & Networking*. Morgan Kaufmann.
- González, J., & Salamanca, O. (2016). *El Camino Hacia la Tecnología 5G. Télématicque*. Revista Electrónica de Estudios Telemáticos. <https://www.redalyc.org/pdf/784/78445977002.pdf>
- Gopal, B. G., & Kuppusamy, P. G. (2015). *A comparative study on 4G and 5G technology for wireless applications*. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, 10(6), 2278-2834.
- Goyal, J., Singla, K., & Singh, S. (2020). *A Survey of Wireless Communication Technologies from 1G to 5G*. In Second International Conference on Computer Networks and Communication Technologies: ICCNCT 2019 (pp. 613-624). Springer International Publishing.

- Han, L., Liu, S., Chen, L., Zhang, C., & Zhou, X. (2017). *A Joint Handover Control and User Association Algorithm for Load Balancing in Heterogeneous Networks*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 66(1), 703-714
- Haykin, S., & Moher, M. (2005). *Introduction to Analog and Digital Communications*. Wiley.
- Hegazy, R. D., Nasr, O. A., & Kamal, H. A. (2018). *Optimization of user behavior based handover using fuzzy Q-learning for LTE networks*. Wireless Networks, 24, 481-495.
- Hodara, Henri & Skaljo, Edvin. (2021). *From 1G to 5G*. Fiber and Integrated Optics. 40. 1-99. 10.1080/01468030.2021.1919358.
- Imoize, A. L., & Adegbite, O. D. (2018). *Measurements-based performance analysis of a 4G LTE network in and around shopping malls and campus environments in Lagos Nigeria*. Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment, 14(2), 208.
- Kawamura, K., Murata, M., Higuchi, S., & Kurokochi, F. (2012). *Management System for Mobile Networks*. FUJITSU Sci. Tech. J, 48(1), 47-53.
- Kharchenko, S. G., & Zhizhin, N. K. (2020). *Fifth generation of wireless networks (5G): Problems and risks*. Ecology and Industry of Russia, 24(12), 58–65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-12-58-65>
- Khattab, A., Ali, A., & El-saadany, E. (2014). *Power Load Balancing and Resource Allocation for Co-channel Interference Mitigation in Cellular Networks*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63(4), 1541-1552.
- Klir, G. J., St. Clair, U., & Yuan, B. (1997). *Fuzzy set theory: foundations and applications*. Prentice-Hall, Inc.
- Kodikara, R., Ahlund, C., & Zaslavsky, A. (2008). *Towards context aware adaptation in wireless networks*. 2008 The Second International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies.

- Krasniqi, F., Gavrilovska, L., & Maraj, A. (2019). *The analysis of key performance indicators (KPI) in 4G/LTE networks*. En Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering (pp. 285–296). Springer International Publishing.
- Lemlouma, T., & Layaida, N. (2004). *Context-aware adaptation for mobile devices*. IEEE International Conference on Mobile Data Management, 2004. Proceedings. 2004.
- Li, Y., Su, S., & Chen, S. (2015). *Social-aware resource allocation for device-to-device communications underlying cellular networks*. IEEE wireless communications letters, 4(3), 293–296. <https://doi.org/10.1109/lwc.2015.2410768>
- Lin, C., & Ci, S. (2012). *An Improved Cell Selection Algorithm Based on QoS and Load Balancing for LTE Femtocell Networks*. International Journal of Distributed Sensor Networks, 8(1), 1-10.
- Liu, L., Ai, B., Zhang, X., & Chen, X. (2016). *A Comprehensive Analysis of Tilt Optimization for LTE Networks*. Wireless Personal Communications, 86(1), 317-331.
- Ma, B., Yang, B., Zhu, Y., & Zhang, J. (2020). *Context-aware proactive 5G load balancing and optimization for urban areas*. IEEE access: practical innovations, open solutions, 8, 8405–8417. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2964562>
- Mahesh, B. (2018). *Machine Learning Algorithms -A Review*. International Journal of Science and Research (IJSR), 2319–7064. <https://doi.org/10.21275/ART20203995>
- Mahmud, H. (2019). *Cellular mobile technologies (1G to 5G) and massive MIMO*. Int. J. Sci. Res, 8(7), 929-937.
- Mathieu, B., Song, M., Galis, A., Cheng, L., Jean, K., Ocampo, R., Brunner, M., Stiemerling, M., & Cassini, M. (2007). *Self-management of context-aware overlay ambient networks*. 2007 10th IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management.
- Molisch, A. F. (2011). Wireless Communications. Wiley.

- Muñoz, P., Barco, R., & de la Bandera, I. (2013). *Optimization of load balancing using fuzzy Q-Learning for next generation wireless networks*. *Expert Systems with Applications*, 40(4), 984–994. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.071>
- Muñoz, P., Barco, R., Ruiz-Aviles, J. M., de la Bandera, I., & Aguilar, A. (2013). *Fuzzy rule-based reinforcement learning for load balancing techniques in enterprise LTE femtocells*. *IEEE transactions on vehicular technology*, 62(5), 1962–1973. <https://doi.org/10.1109/tvt.2012.2234156>
- Ning, G., Zhu, G., Peng, L., & Lu, X. (2006). *Load balancing based on traffic selection in heterogeneous overlapping cellular networks*. 2005 1st IEEE and IFIP International Conference in Central Asia on Internet.
- Noj, M., & Kumar, S. (2022). *Optimal cell selection with load balancing and handover optimisation in LTE-advanced networks*. *International journal of engineering trends and technology*, 70(4), 21–30. <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v70i4p203>
- Olsson, M., Sultana, S., Rommer, S., Frid, L., & Mulligan, C. (2013). *Architecture Overview. EPC and 4G Packet Networks*, 17–64. doi:10.1016/b978-0-12-394595-2.00002-5
- Porch, J. B., Heng Foh, C., Farooq, H., & Imran, A. (2020). *Machine learning approach for automatic fault detection and diagnosis in cellular networks*. 2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom).
- Rappaport, T. S., Heath, R. W., Daniels, R. C., & Murdock, J. N. (2019). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Pearson Education.
- Rehman, A., Singh, A. K., Singh, A., & Dubey, E. P. (2022). *Mamdani and Sugeno Fuzzy Logic approach of PID controller*. *International journal for research in applied science and engineering technology*, 10(5), 5016–5022. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.43542>
- Reznik, L. (1997). *Fuzzy controllers handbook: how to design them, how they work*. Elsevier.

- Rodriguez, J., De la Bandera, I., Munoz, P., & Barco, R. (2011). *Load balancing in a realistic urban scenario for LTE networks*. 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring).
- Saeed, R. A. (2019). *Handover in a mobile wireless communication network—A Review Phase*. International Journal of Computer Communication and Informatics, 1(1), 6-13.
- Sari, W. E., Wahyunggoro, O., & Fauziati, S. (2016). *A comparative study on fuzzy Mamdani-Sugeno-Tsukamoto for the childhood tuberculosis diagnosis*.
- Series, M. (2009). *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced*. Report ITU, 638(31).
- Sharma, A., Sharma, P., Chaki, R., & Bhattacharya, U. (2014). *Reducing call blocks in cellular network with non-uniform traffic conditions*. Poznan University of Technology. Institute of Computing Science. Foundations of Computing and Decision Sciences, 39(4), 301–318. <https://doi.org/10.2478/fcds-2014-0016>
- Shinde, P. P., & Shah, S. (2018). *A review of machine learning and deep learning applications*. In 2018 Fourth international conference on computing communication control and automation (ICCUBEA) (pp. 1-6). IEEE.
- Shiwei, G. (2021). *Load balancing algorithm for heterogeneous wireless networks based on motion state estimation*. 2021 IEEE 9th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN). IEEE.
- Shukurillaevich, U. B., Sattorivich, R. O., & Amrillojonovich, R. U. (2019). *5g Technology Evolution*. 2019 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). doi:10.1109/icisct47635.2019.9011
- Silva, K. C., Becvar, Z., Cardoso, E. H., & Francês, C. R. (2018). *Self-tuning handover algorithm based on fuzzy logic in mobile networks with dense small cells*. In 2018 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC) (pp. 1-6). IEEE.

- Simsek, M., Bennis, M., & Guvenc, I. (2015). *Context-aware mobility management in HetNets: A reinforcement learning approach*. 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).
- Sreejith, S., & Rajak, A. (2020). *Study on optimization of handoff process using fuzzy logic for mobile communication*. Journal of physics. Conference series, 1706(1), 012161. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012161>
- Stallings, W. (2009). *Wireless communications & networks*. Pearson Education India.
- Stallings, W., & Van Slyke, R. M. (2013). *Wireless Communication Networks and Systems*. Pearson Education.
- Suknum, S., Thoasiri, C., & Jinaporn, N. (2022). *Q-learning-based resource allocation in heterogeneous cellular networks*. 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON).
- Topaloglu, F., & Pehlivan, H. (2018). *Comparison of Mamdani type and Sugeno type fuzzy inference systems in wind power plant installations*. 2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS).
- Torres, R., Fortes, S., Baena, E., & Barco, R. (2021). *Social-aware load balancing system for crowds in cellular networks*. IEEE access: practical innovations, open solutions, 9, 107812–107823. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3100459>
- Trejo, E. & Hernandez, C. (2018). *Algoritmos de traspaso de redes LTE en medios de transporte masivo*. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/journal/4115/411556117002/html/>
- Ud Din Arshad, Q. K., Kashif, A. U., & Quershi, I. M. (2019). *A Review on the Evolution of Cellular Technologies*. 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). doi:10.1109/ibcast.2019.8667173
- Vacca, J. R. (Ed.). (2014). *Network and system security*. Syngress Publishing.

- Villegas, J., Baena, E., Fortes, S., & Barco, R. (2021). *Social-aware forecasting for cellular networks metrics*. IEEE communications letters: a publication of the IEEE Communications Society, 25(6), 1931–1934. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2021.3065812>
- Walrand, J., & Varaiya, P. (1999). *High performance communication networks 2E*: International student edition (2a ed.). Morgan Kaufmann.
- Wang, X., Wang, S., Liang, X., Zhao, D., Huang, J., Xu, X., ... & Miao, Q. (2022). *Deep reinforcement learning: a survey*. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems.
- Wicker, S. B. (1999). *Error Control Systems for Digital Communication and Storage*. Prentice Hall.
- Yadav, R. (2017). *Challenges and evolution of next generations wireless communication*. In Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (Vol. 2).
- Yanmaz, E., & Tonguz, O. K. (2005). *Handover performance of dynamic load balancing schemes in cellular networks*. 10th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'05).
- Yuan, B., Klir, G. J., & Clair, U. (1997). *Fuzzy set theory: Foundations and applications*. Prentice Hall.
- Zander, J., Bolin, K., & Gudmundson, B. (1996). *Tilt Control in Cellular Radio Systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 45(3), 466-478.
- Zhang, B., Li, Y., Jin, D., Hui, P., & Han, Z. (2015). *Social-aware peer discovery for D2D communications underlying cellular networks*. IEEE transactions on wireless communications, 14(5), 2426–2439. <https://doi.org/10.1109/twc.2014.2386865>

Zhang, J., Yu, F. R., Wang, S., Huang, T., Liu, Z., & Liu, Y. (2018). *Load balancing in data center networks: A survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(3), 2324–2352. <https://doi.org/10.1109/comst.2018.2816042>

Zhang, Y., Zhang, T., Liu, F., & Lu, X. (2013). *Tilt Optimization for Coverage and Capacity Balancing in Cellular Networks*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 62(3), 1254-1267.

11. Anexos

Anexo 1. Certificado de traducción del resumen



Lic. Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN MENCIÓN INGLÉS

CERTIFICO:

Yo, Karina Yajaira Martínez Luzuriaga con cédula de identidad Nro. 1104902679, **Licenciada en Ciencias de la Educación Mención Inglés** por la Universidad Técnica Particular de Loja, con número de registro 1031-2022-2574017 en la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, he traducido al idioma inglés el resumen del trabajo de titulación denominado **"Evaluación de Parámetros de Optimización de Sistemas de Balanceo de Carga para Redes Móviles Basado en Contexto Social"** elaborado por mi persona, egresada de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones.



Lic. Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

C.I. 1104902679

REGISTRO SENESCYT N°: 1031-2022-2574017