



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

“Simulación de un algoritmo predictivo para la toma de decisiones en vertical
HANDOVER para redes 4G LTE y Satelitales”

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Electrónico y de
Telecomunicaciones**

Autor:

Caisaguano Vega, Blanca Cecilia

Tutor:

Mgs. José Luis Jinez Tapia

Riobamba, Ecuador. 2025

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, Blanca Cecilia Caisaguano Vega, con cédula de ciudadanía 180507193-1, autora del trabajo de investigación titulado: **SIMULACIÓN DE UN ALGORITMO PREDICTIVO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN VERTICAL HANDOVER PARA REDES 4G LTE Y SATELITALES**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autora de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 12 de diciembre de 2024



Blanca Cecilia Caisaguano Vega

C.I: 180507193-1

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado del trabajo de investigación **SIMULACIÓN DE UN ALGORITMO PREDICTIVO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN VERTICAL HANDOVER PARA REDES 4G LTE Y SATELITALES**, presentado por Blanca Cecilia Caisaguano Vega, con cédula de identidad número 180507193-1, emitimos el **DICTAMEN FAVORABLE**, conducente a la **APROBACIÓN** de la titulación. Certificamos haber revisado y evaluado el trabajo de investigación y cumplida la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 12 de diciembre de 2024

Daniel Antonio Santillán Haro, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Manuel Antonio Meneses Freire, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



José Luis Jinéz Tapia, Mgs.
TUTOR



CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **SIMULACIÓN DE UN ALGORITMO PREDICTIVO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN VERTICAL HANDOVER PARA REDES 4G LTE Y SATELITALES**, presentado por Blanca Cecilia Caisaguano Vega, con cédula de identidad número 180507193-1, bajo la tutoría de Mgs. José Luis Jinez Tapia; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 12 de diciembre de 2024.

Presidente del Tribunal de Grado
PhD. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda



Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Daniel Antonio Santillán Haro



Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Manuel Antonio Meneses Freire





Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-02.20
VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **CAISAGUANO VEGA BLANCA CECILIA** con CC: **1805071931**, estudiante de la Carrera **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**SIMULACIÓN DE UN ALGORITMO PREDICTIVO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN VERTICAL HANDOVER PARA REDES 4G LTE Y SATELITALES**"; cumple con el 4 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 26 de noviembre de 2024



Mgs. José Luis Jinéz Tapia
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación está dedicado:

A Dios, a mis padres, hermanos y a mi pareja, quienes siempre estuvieron a mi lado en cada momento de alegría y desafío de este camino. Agradezco por el apoyo constante e incondicional espero siempre sean mi red de apoyo.

A la memoria de mi madre y mis ángeles, aunque ya no se encuentran físicamente aquí, el amor, sabiduría y amparo siguen presentes en mi vida. Este logro es un homenaje a su recuerdo.

Blanca Cecilia Caisaguano Vega

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a todas las personas que me acompañaron en este viaje académico, sin su apoyo este logro no hubiera sido posible.

Em primer lugar, a mis padres, quienes me brindaron su amor, paciencia y apoyo incondicional en cada momento. Gracias por creer en mí y por enseñarme el valor de la educación.

A mi tutor, MsC. José Luis Jinez Tapia, por su orientación durante del desarrollo de este trabajo de investigación. Gracias por los consejos y su buena disposición para la culminación de este proyecto.

A mis amigos, quienes compartieron conmigo tanto los momentos de alegría, tristeza y desafío. Gracias por recordarme que no estaba solo en este proceso.

Finalmente, a mi pareja, por su amor, comprensión y apoyo constante. Gracias por ser mi inspiración y motivación.

Blanca Cecilia Caisaguano Vega

ÍNDICE

DERECHOS DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

RESUMEN

ABSTRACT

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN | 16 |
| 1.1 Antecedentes..... | 16 |
| 1.2 Planteamiento del problema | 18 |
| 1.3 Justificación | 20 |
| 1.4 Objetivos..... | 20 |
| 1.4.1 General..... | 20 |
| 1.4.2 Específicos | 20 |
| CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO | 22 |
| 2.1 Redes 4G LTE | 22 |
| 2.1.1 Características y arquitectura..... | 22 |
| 2.1.2 Requisitos para la implementación | 23 |
| 2.1.3 Redes 4G en Ecuador | 24 |
| 2.2 Redes satelitales..... | 25 |
| 2.2.1 Elementos que conforman una red satelital | 25 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.2.2 | Tipos de redes satelitales por su arquitectura | 26 |
| 2.3 | Vertical HandOver..... | 28 |
| 2.3.1 | Importancia de conexión en redes heterogéneas | 29 |
| 2.3.2 | Toma de decisiones en vertical HandOver | 31 |
| 2.4 | Algoritmos de predicción en redes móviles | 32 |
| 2.4.1 | Algoritmos basados en características de decisión..... | 33 |
| 2.4.2 | Algoritmos basados en inteligencia artificial | 33 |
| 2.4.2.1 | Redes neuronales | 33 |
| 2.4.2.2 | Lógica difusa | 35 |
| 2.4.2.3 | KNN más cercanos | 35 |
| 2.5 | Parámetros de evaluación de redes de comunicación..... | 35 |
| CAPITULO III. METODOLOGÍA | | 38 |
| 3.1 | Tipo de investigación..... | 38 |
| 3.2 | Diseño de investigación..... | 38 |
| 3.3 | Técnicas de recolección de Datos..... | 38 |
| 3.4 | Población de estudio y tamaño de muestra..... | 39 |
| 3.4.1 | Población de estudio | 39 |
| 3.4.2 | Tamaño de la muestra | 39 |
| 3.5 | Hipótesis de ser el caso..... | 40 |
| 3.6 | Operacionalización de variables | 40 |
| 3.7 | Métodos de análisis y procesamiento de datos | 40 |
| 3.7.1 | Métodos de análisis | 40 |
| 3.7.2 | Procesamiento de los datos | 41 |
| 3.8 | Diseño del Sistema Predictivo | 41 |
| 3.8.1 | Sistema de Comunicación Satelital | 42 |
| 3.8.2 | Sistema de Comunicación 4G..... | 47 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.8.3 | Parámetros de Medición de Calidad de Red..... | 51 |
| 3.9 | Red Neuronal..... | 55 |
| 3.9.1 | Generación de Base de Datos..... | 55 |
| 3.9.2 | Diseño de Red Neuronal..... | 59 |
| 3.9.3 | Optimización del Sistema Predictivo..... | 63 |
| 3.9.4 | Generación de Sistema de Predicción..... | 66 |
| | CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 68 |
| 4.1 | Resultados Red 4G..... | 68 |
| 4.1.1 | Resultados Red Satelital..... | 71 |
| 4.1.2 | Pruebas de Funcionamiento de Algoritmo Vertical Hand Over..... | 74 |
| | CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 80 |
| 5.1 | Conclusiones..... | 80 |
| 5.2 | Recomendaciones..... | 81 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 82 |
| | ANEXOS..... | 88 |
| | ANEXO A - Retropropagación con Gradiente Conjugado..... | 88 |
| | ANEXO B - Regularización Bayesiana..... | 90 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Arquitectura de Sistemas LTE [16]..... | 23 |
| Figura 2. Cobertura de Servicio Móvil 4G con respecto a la población [18]..... | 24 |
| Figura 3. Topología de una red satelital de comunicaciones [19]..... | 25 |
| Figura 4. Antena VSAT para Red Satelital [19]..... | 26 |
| Figura 5. Modem utilizado para la comunicación Satelital [19]..... | 26 |
| Figura 6. Esquema de Redes Unidireccionales [20]..... | 27 |
| Figura 7. Esquema de una Red Satelital Híbrida [20]..... | 27 |
| Figura 8. Esquema de una Red Bidireccional [20]..... | 28 |
| Figura 9. Esquema de Vertical HandOver..... | 29 |
| Figura 10. Esquema de una red Heterogénea [22]..... | 30 |
| Figura 11. Diagrama de Bloques de la Investigación..... | 42 |
| Figura 12. Diagrama de Bloques Simulink Enlace Satelital..... | 43 |
| Figura 13. Parámetros del Modelo Satelital Júpiter 3..... | 44 |
| Figura 14. Bloques del Transmisor Satelital..... | 45 |
| Figura 15. Canal de Transmisión Satelital..... | 45 |
| Figura 16. Receptor Satelital..... | 46 |
| Figura 17. Constelación 16 QAM (a) Transmitida – Azul (b) Recibida – Amarilla..... | 47 |
| Figura 18. Señal Recibida en Frecuencia del Sistema Satelital..... | 47 |
| Figura 19. Diagrama de Bloques del Sistema de Comunicación 4G..... | 48 |
| Figura 20. Bloques Correspondientes al Transmisor 4G LTE..... | 49 |
| Figura 21. Canal de Transmisión de la Red 4G..... | 49 |
| Figura 22. Bloques del Sistema de Recepción 4G..... | 50 |
| Figura 23. Diagrama de Constelación a) Señal Transmitida - b) Señal Recibida..... | 50 |
| Figura 24. Espectro en Frecuencia de la Señal 4G Recibida..... | 51 |
| Figura 25. Bloque Find Delay para Medición de Latencia..... | 52 |
| Figura 26. Bloque de Cálculo de BER para los Sistemas..... | 52 |
| Figura 27. Bloque para Medición de Nivel de Señal de los Sistemas..... | 53 |
| Figura 28. Relación entre Distancia y SNR..... | 54 |
| Figura 29. Diagrama de Bloques para Conversión de Distancia a SNR..... | 54 |
| Figura 30. Sistema para Extraer Datos de Entrenamiento..... | 57 |
| Figura 31. Variable de Matlab con los Datos de Entradas y Salidas de Entrenamiento para Red Neuronal..... | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 32. Pantalla Principal de Herramienta Neural Net Fitting | 59 |
| Figura 33. Importación de Datos de Entrenamiento | 60 |
| Figura 34. Estructura de la Red Neuronal Diseñada..... | 60 |
| Figura 35. Selección de Cantidad de Datos de Validación y Función de Entrenamiento | 61 |
| Figura 36. Respuesta del Proceso de Entrenamiento..... | 61 |
| Figura 37. Resultados de MSE y R para Red Neuronal Diseñada..... | 62 |
| Figura 38. Gráfica de MSE durante el proceso de Entrenamiento Red Diseñada..... | 62 |
| Figura 39. Gráficas de Regresión de la Red Neuronal Diseñada | 63 |
| Figura 40. Estructura de la Red Neuronal Optimizada..... | 64 |
| Figura 41. Parámetros de Entrenamiento de Red Neuronal Optimizada..... | 64 |
| Figura 42. Respuesta de Entrenamiento de Red Neuronal Optimizada..... | 65 |
| Figura 43. Resultados de Entrenamiento de Red Neuronal Optimizada | 65 |
| Figura 44. Respuesta de MSE de Red Neuronal Optimizada | 66 |
| Figura 45. Respuesta de Regresión en Red Neuronal Optimizada..... | 66 |
| Figura 46. Diagrama de Flujo del Sistema de Vertical Hand Over | 67 |
| Figura 47. Resultado de BER en RED 4G en Cada Segmento..... | 69 |
| Figura 48. Resultado de SNR en RED 4G en Cada Segmento..... | 69 |
| Figura 49. Resultado de Latencia en RED 4G en Cada Segmento..... | 70 |
| Figura 50. Resultado de Nivel de Señal en RED 4G en Cada Segmento | 71 |
| Figura 51. Resultado de BER en RED Satelital para Cada Segmento | 72 |
| Figura 52. Resultado de SNR en RED Satelital para Cada Segmento | 72 |
| Figura 53. Resultado de Latencia en RED Satelital para Cada Segmento | 73 |
| Figura 54. Resultado de Nivel de Señal en RED Satelital para Cada Segmento..... | 73 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Variables Involucradas en el problema de investigación..... | 40 |
| Tabla 2. Características Relevantes del Satélite Jupiter 3 [31]..... | 42 |
| Tabla 3. Atributos de Entrada del Sistema..... | 55 |
| Tabla 4. Rangos de Atributos de Entrada con Respecto a Calidad de Señal..... | 56 |
| Tabla 5. Asignación de Variables Numéricas a Variables Cualitativas..... | 57 |
| Tabla 6. Intervalos de Pruebas para Generación de Datos de Entrenamiento | 58 |
| Tabla 7. Resultados de Estimación de Parámetros en Red 4G | 68 |
| Tabla 8. Resultados de Estimación de Parámetros en Red Satelital | 71 |
| Tabla 9. Resultados de Entradas para el Rango de 0 a 3000 Metros | 74 |
| Tabla 10. Resultados de Predicción de Pruebas en Rango de 0 a 3000 Metros | 74 |
| Tabla 11. Resultados de Entradas para el Rango de 3001 a 6000 metros | 75 |
| Tabla 12. Resultados de Predicción Pruebas en Rango 3001 a 6000 Metros | 76 |
| Tabla 13. Resultados de Entradas en Rango de 6001 a 9000 Metros | 76 |
| Tabla 14. Resultados de Predicción en Pruebas de Rango 6001 a 9000 Metros | 77 |
| Tabla 15. Resultados de Entradas para el Rango de 9001 a 12000 Metros | 77 |
| Tabla 16. Resultados de Predicción en Pruebas de Rango 9001 a 12000..... | 78 |
| Tabla 17. Matriz de Confusión de Salida de Predicción de Enlace | 79 |

RESUMEN

La calidad de la señal en dispositivos móviles es un factor importante que determina la eficiencia y confiabilidad de las comunicaciones inalámbricas. Dentro de la mejora en sistemas de comunicación, El Vertical Hand Over es un proceso crítico en la gestión de redes, el cual permite la transferencia fluida de una conexión de red a otra. En el presente estudio se realiza la simulación de un algoritmo predictivo para la toma de decisiones en vertical Hand Over para redes 4G LTE y Satelitales, para lo cual se identificaron parámetros como en la latencia, BER, SNR y Nivel de Señal, en la calidad de señales de un sistema inalámbrico. Se genera una simulación en Matlab para la recopilación de 3000 datos que permiten la estimación de estos parámetros en base a la distancia con respecto a la red. Las pruebas de simulación del algoritmo predictivo mostraron una exactitud del 80% y una precisión del 96.9%, demostrando un sistema confiable que permite la predicción correcta del Vertical Hand Over en las redes analizadas en base de los parámetros de calidad detectados.

Palabras Clave: BER, SNR, Latencia, Algoritmo, Predicción, Vertical Hand Over.

ABSTRACT

Signal quality in mobile devices is an important factor that determines the efficiency and reliability of wireless communications. Within the improvement of communication systems, Vertical Hand Over is a critical process in network management, which allows the fluid transfer from one network connection to another. In the present study, the simulation of a predictive algorithm for vertical handover decision-making for 4G LTE and Satellite networks was carried out, for which parameters such as latency, BER, SNR, signal level, and quality were identified. signals of a wireless system were also considered. A simulation was generated in Matlab for the collection of 3000 data points that allows the estimation of these parameters based on the distance with respect to the network. Simulation tests of the predictive algorithm showed an accuracy of 80% and a precision of 96.9%, demonstrating a reliable system that allows the correct prediction of the Vertical Hand Over in the analysed networks based on the detected quality parameters.

Keywords: BER, SNR, Latency, Algorithm, Prediction, Vertical HandOver.



Revised by
Mario N. Salazar

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.

Las redes de comunicación han evolucionado con el tiempo atravesando por diferentes tecnologías como la 1G, 2G, 3G y actualmente la 4G. En Ecuador la red 4G fue introducida en el año 2014 a través de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT). El Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL) ha asignado la banda de 1700 MHz, que también se la conoce por sus servicios inalámbricos avanzados (AWS), para uso de la red móvil de 4 generación (4G) a las empresas telefónicas Claro y Movistar, mientras que a la telefónica estatal CNT se le ha otorgado 40 MHz en la banda AWS y 30 MHz en la banda de 700 MHz para lograr mantener una alta calidad de servicio debido a la gran demanda de usuarios [1].

Los dispositivos móviles son muy utilizados y su conexión a Internet permite acceder a contenidos como multimedia, comunicación, redes sociales e información. Por esto es necesario garantizar un buen desempeño de la red y promover la satisfacción del usuario final. El aumento de los sistemas de telecomunicaciones móviles a gran escala ha instituido la implementación de nuevas tecnologías permitiendo al usuario percibir mejoras en su servicio como por ejemplo la velocidad de transmisión, mayor cobertura y capacidad para los dispositivos móviles actuales [2].

La red 4G es la generación de red móvil que promete mayor velocidad, sin embargo, uno de los desafíos que enfrenta es la movilidad del dispositivo ya que debe pasar de una celda a otra sufriendo una desconexión instantánea que se refleja en pérdida de paquetes de datos. Este proceso se lleva a cabo gracias a una toma de decisiones para determinar si este debe mantener la conexión actual o definir si requiere el cambio a una nueva conexión, esto se conoce como HandOver, en donde se determinan los mejores parámetros de red sin importar que provenga de una tecnología diferente [3].

La gestión que ejecuta el HandOver debe considerar aspectos como la movilidad, la métrica de parámetros de QoS, algoritmos y procesos de decisión diferentes que requieren de su análisis para la ejecución óptima y eficiente [4].

Existen diversos métodos de inteligencia artificial y toma de decisiones que permiten realizar este proceso de manera adecuada, sin embargo, con la evolución del aprendizaje por computador y algoritmos predictivos, se pueden diseñar nuevos sistemas que realizar las acciones de HandOver en diferentes redes de manera mucho más eficiente.

La selección automática de una nueva conexión desde un dispositivo móvil es una decisión provista por el sistema y que puede generar efectos tanto positivos como negativos tomando en cuenta el servicio y la red [5]. Esto depende de la toma de decisiones que presentan los algoritmos de HandOver, considerando que este cambio debe ser imperceptible para el usuario y que la conexión nueva tenga todos los beneficios y requerimiento de calidad que requiere el usuario [4].

Por otro lado, los sistemas de comunicación por satélite proporcionan un nivel de conectividad global en cualquier momento y lugar del mundo, generando accesibilidad en áreas donde antes era imposible tener cobertura de internet. Al tener un alcance global con un ancho de banda bajo demanda de capacidad estas redes permiten el acceso desde cualquier punto de la tierra mientras el satélite tenga cobertura [6].

Considerando el diseño del sistema propuesto por Quiñones et al. [1] donde se menciona que el protocolo MQTT ofrece mejores resultados respecto a latencia, energía consumida y datos móviles, además de flexibilidad y escalabilidad para integrar con otras tecnologías de comunicación.

El trabajo de investigación desarrollado por Escudero [7] que demuestra una mejora en la red gracias a la reducción de las fallas del protocolo HandOver y el efecto ping-pong que se denomina al proceso cuando el usuario se desconecta de la estación base y trata de conectarse a la estación más cercana sin éxito por lo que se produce un efecto rebote ya que vuelve a conectarse a la anterior y genera una degradación a la red perjudicando la comunicación del usuario. El modelo matemático se basó en el ajuste de valores del tiempo de transición y la Histéresis para automatizarlos en función de la relación señal-ruido-interferencia.

El modelo propuesto por Rocha [3] establece una correlación entre las potencias de las celdas denominadas vecina y servidora cuya diferencia produce un HandOver en la conectividad, se determina además que la velocidad con la que se mueve el dispositivo es un factor determinante para aumentar la frecuencia del error.

Los trabajos indicados presentan resultados favorables en otros escenarios que son similares a la línea de investigación del presente trabajo brindando información relevante para el desarrollo del algoritmo dedicado a la toma de decisiones de manera eficiente en el proceso de HandOver entre las redes móviles 4G LTE y satelitales.

1.2 Planteamiento del problema

Los avances de la tecnología en los últimos años y el crecimiento de las telecomunicaciones móviles han permitido que los usuarios a través de sus dispositivos puedan instalar aplicaciones que facilitan su comunicación y simplifiquen tareas diarias. Por esta razón, actualmente muchos equipos demandan de una conexión constante que les brinde un servicio de calidad en torno a las características de velocidad de transmisión, cobertura y capacidad para los dispositivos y equipos que se manejan en la actualidad y que requieren de una conexión a internet.

La red móvil de cuarta generación, más conocida como 4G, y las conexiones satelitales como VSAT han permitido complacer las demandas de conectividad de los usuarios [8]. Se debe considerar que el uso masivo de las redes de acceso genera problemas como es el caso de la reducción en velocidad de datos y la calidad del servicio [7].

Los sistemas de red celular tradicional, como el 4G, utilizan estaciones base con una amplia cobertura y se las conoce como macroceldas. De esta manera se provee de servicio a ciudades, barrios, etc.; sin embargo, existe un problema, cuando la capacidad de la macrocelda incrementa la cantidad de usuarios conectados, se produce un retardo al utilizar el servicio de internet, lo que genera un decremento de la calidad de servicio (por ejemplo, en video llamada o video conferencias) [9]. Otro gran problema de la tecnología móvil es que existen zonas de sombra por las cuales el nivel de señal resulta ser mucho menor que el servicio normal lo que se conoce como falta de cobertura [10].

Sin embargo, el mayor inconveniente en general de todas las tecnologías es que el usuario está en constante movimiento, es decir se transporta de un lado a otro, lo que provoca el evento de retardo y pérdida de paquetes, debido al cambio de red o HandOver, ya que el usuario experimenta una desconexión hacia el nodo fuente y por un período de tiempo muy corto establece un nuevo enlace de conexión con otro nodo de destino, sea este del mismo u otro tipo de tecnología [11].

Tomando en cuenta que los sistemas de comunicación por satélite brindan mayor conectividad a nivel global en todo momento y localización, permitiendo tener acceso en zonas que antes no contaban con cobertura de internet. Considerando su alcance y un ancho de banda que se ajusta a la demanda de capacidad, esta tecnología de red brinda accesibilidad desde todos los puntos terrestres que tiene cobertura el satélite [6].

En el Ecuador existen permisos de operación para cierto tipo de satélites en donde se encuentra el Júpiter 3, mismo que permite el abastecimiento de internet para la empresa Hughes Net. Sin embargo, el ancho de banda que ofrece es limitado y no posee gran velocidad, pero al tener cobertura en ciertas áreas que no llega la tecnología móvil puede permitir disminuir las pérdidas de conexión que se generan al tener limitada o baja cantidad de red móvil [12].

En redes satelitales, se producen dos tipos de HandOver, el SFC y el EFC. En los sistemas SFC, la posición de la celda relativa al satélite no cambia, es decir, las celdas en tierra se mueven sincrónicamente con la posición satelital. En los sistemas EFC, la superficie terrestre se divide en celdas predeterminadas con límites fijos; por lo que el satélite tiene una hora estipulada para ser asignada con una celda fija. Cuando se produce un cambio en la dirección del Protocolo de Internet (IP) del usuario debido al cambio del área de cobertura, se realizará un traspaso de la capa de red, transfiriendo las conexiones actuales de los protocolos de nivel superior a una nueva dirección IP [13].

Estos cambios de conexión o HandOver han sido desarrollados mediante diversos algoritmos que permiten la clasificación e identificación de los parámetros para establecer la conexión o no hacia una nueva red de acceso. Sin embargo, se pueden diseñar y optimizar los nuevos algoritmos para obtener respuestas más rápidas y eficientes con el objetivo de que el usuario final posea una calidad de servicio que satisfaga sus necesidades.

La decisión del HandOver requiere de mediciones e información acerca de cuándo y a hacia dónde va la nueva conexión. Estos parámetros son obtenidos de la retroalimentación de valores como Latencia, Calidad de Servicio, entre otros [14]. Generalmente estos procesos de toma de decisiones están relacionados con algoritmos de inteligencia artificial ya que, en base a ciertos rangos de estimación, son los que se encargan de realizar el HandOver hacia la nueva conexión [7].

Para solucionar este problema se propone implementar un algoritmo predictivo mediante redes neuronales que permita realizar de manera eficiente el proceso de HandOver entre las redes móviles 4G LTE y satelitales, considerando los parámetros e información del satélite Júpiter 3.

1.3 Justificación

En la actualidad, la cantidad de equipos y dispositivos que demandan una conectividad constante ha incrementado considerablemente debido a los requerimientos de comunicación de los usuarios, motivo por el cual las nuevas tecnologías como redes 4G y conexiones satelitales como VSAT se han desarrollado y renovado para brindar una mejor calidad en llamadas y mayor cobertura para acceso a internet [8].

Para establecer una conexión estable y constante que permita el envío y recepción de información existe el proceso denominado HandOver quien decide si el dispositivo requiere cambiar a una nueva conexión cuando se encuentra en una zona con varias tecnologías de acceso considerando los parámetros de red que brindan. El HandOver se basa en algoritmos para clasificar e identificar las características de las redes facilitando la decisión de mantener o cambiar la red de acceso [3].

Por esta razón se plantea la implementación de un algoritmo predictivo mediante redes neuronales que permita realizar de manera eficiente el HandOver entre las redes móviles 4G LTE y satelitales, en este caso considerando los parámetros e información del satélite Júpiter 3. Se considera realizar una simulación en donde se varíen los cambios de distancia, calidad de servicio, latencia y velocidad de transmisión para que el algoritmo considere todas las métricas y realice un óptimo HandOver.

De esta manera se propone una solución para el inconveniente de cobertura en áreas donde la tecnología móvil no brindan cobertura y los sistemas de comunicación satelital del Júpiter 3 puede permitir la reducción de pérdidas de conexión ya que proporciona un nivel de conectividad global.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Simular un algoritmo predictivo para la toma de decisiones en vertical handover para redes 4G LTE y Satelitales.

1.4.2 Específicos

- Realizar el análisis de la bibliografía y la información relacionada a los diferentes algoritmos que permiten realizar el procedimiento de Vertical HandOver.

- Recopilar información de nivel de señal, latencia, distancia con respecto al dispositivo, SNR y BER en redes 4G LTE y satelital.
- Diseñar e implementar un modelo predictivo de aprendizaje automático basado en redes neuronales que permita pronosticar el rendimiento de las condiciones de las redes y seleccione la que posea mejor calidad de conexión.
- Realizar la simulación, pruebas, evaluación y optimización del algoritmo propuesto.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Redes 4G LTE

Las generaciones de sistemas móviles se desarrollan mediante la creación y expansión de servicios nuevos para dispositivos y equipos móviles, habilitados por los avances tecnológicos en sistemas móviles. La Cuarta Generación (4G) se caracteriza por utilizar completamente el protocolo IP y tiene como objetivo proporcionar tasas de transmisión de hasta 100 Mbps en condición de movimiento y 1 Gbps en estaciones fijas. Además, se puede destacar que se da prioridad al tráfico de datos o información de acuerdo con el tipo de aplicación mediante el uso de parámetros de Calidad de Servicio (QoS) [15].

El servicio de voz se establece mediante la conmutación de paquetes mientras se mejora la funcionalidad de diversas aplicaciones, como es el caso de videoconferencias, reproducción de videos en alta calidad, juegos en tiempo real y transmisión de televisión móvil. Este enfoque hacia la conmutación destaca la capacidad de las redes de cuarta generación (4G) para ofrecer servicios variados y brindar mejor experiencia durante el uso de diferentes aplicaciones y servicios multimedia [15].

2.1.1 Características y arquitectura

La arquitectura completa del sistema LTE, formalmente denominado Evolved Packet System (EPS), siguiendo la estructura general de los sistemas 3GPP se puede observar en la Figura 1. Los elementos esenciales de LTE comprenden la novedosa red de acceso E-UTRAN, el dominio de paquetes EPC en la red troncal (referido como red troncal EPC en adelante) y la evolución del subsistema IMS, inicialmente concebido para los sistemas UMTS. Todas estas unidades han sido diseñadas para respaldar diversos servicios de telecomunicaciones gracias a la conmutación de paquetes, eliminando la necesidad de un componente anexo para la prestación de servicios en modo circuito. Además, se destaca que el EPC representa una versión renovada del sistema GPRS, permitiendo el soporte de servicios con limitaciones de tiempo real a través de la conmutación de paquetes en el sistema LTE [16].

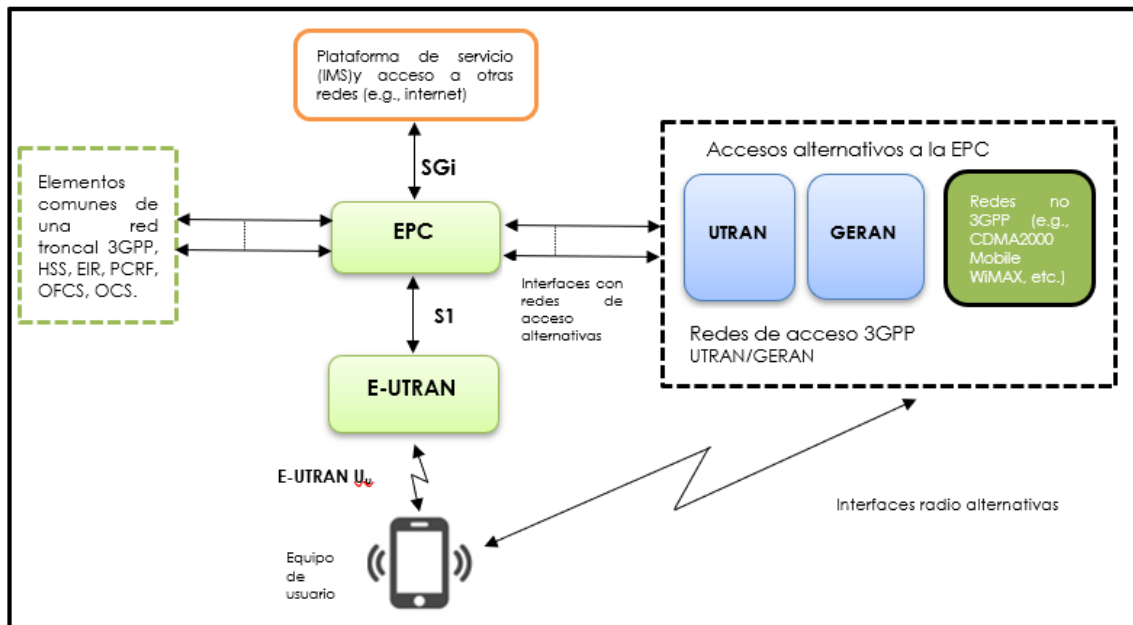


Figura 1. Arquitectura de Sistemas LTE [16].

Desde su inicio en 2004, el desarrollo de LTE ha estado enfocado en mejorar el acceso radio terrestre de UMTS (UTRA) y optimizar la arquitectura 3GPP de acceso radio. Se buscaba lograr velocidades de datos de usuario más altas en el enlace descendente, alcanzando hasta 100 Mbit/s (tres a cuatro veces más rápido que HSDPA en la Rel-6), y de 50 Mbit/s en el enlace ascendente (dos a tres veces más rápido que HSUPA). En 2007, la tecnología de acceso en frecuencia LTE E-UTRA pasó de la etapa de viabilidad a la elaboración de especificaciones técnicas, y a fines de 2008, estas eran lo suficientemente estables para su implementación comercial [16].

En la elección de métodos de acceso, se seleccionó OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access) para el enlace descendente y SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiplexing Access) para el enlace ascendente. Respecto a los esquemas de modulación, se definieron diversos esquemas para ambos enlaces, como BPSK, QPSK, 16 QAM y 64 QAM para el enlace descendente, y QPSK, 8 PSK y 16 QAM para el enlace ascendente. E-UTRA emplea una variedad de anchos de banda de canal entre 1,25 y 20 MHz, en contraste con el valor fijo de 5 MHz por canal en UTRA. Además, se destaca que para canales de difusión (broadcast) solo se utiliza QPSK [16].

2.1.2 Requisitos para la implementación

La red 4G, basándose en los avances de sus predecesoras, se concentra en proporcionar velocidades significativamente mayores, alcanzando un estándar de 150 Mb/s, y llegando,

mediante la tecnología 4G Plus (4G+), a conexiones de hasta 450 Mb/s. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) desempeña un papel crucial en la formulación y regulación de las especificaciones necesarias, emitiendo estándares para guiar la adopción e implementación de estas tecnologías de comunicación [17].

En términos de requisitos técnicos, la red 4G establece la conexión mediante paquetes de transmisión de datos utilizando el protocolo IP. La UIT define velocidades de transmisión entre 100 Mb/s (12.5 Mb/s) para movilidad alta y 1 Gb/s (125 Mb/s). Aunque inicialmente la LTE no cumplía estos estándares, tras una evaluación de la UIT, se la incorporó al grupo, reconociendo su rápido avance. Adicionalmente, se requiere mantener latencias entre 20 y 30 milisegundos [17].

Desde una perspectiva técnica, estos requisitos delimitan las condiciones para la implementación por parte de las empresas de servicios de comunicación, quienes buscan expandir la cobertura en todo el territorio para llegar a más usuarios y ofrecerles beneficios de conexiones más rápidas [17].

2.1.3 Redes 4G en Ecuador

El Ministerio de Telecomunicaciones tiene como objetivo principal ampliar significativamente el servicio móvil avanzado 4G, detectando áreas claves a atender mediante planes y estrategias de gobierno. Al concluir el año 2021, la cobertura poblacional con tecnología 4G alcanzó el 75,92%, un incremento de 15,18 puntos porcentuales en comparación con el año anterior, pasando de 60,74% a 75,92%. Esto representó un aumento de la población cubierta, que pasó de 10.635.965 personas en 2020 a 13.476.769 personas en 2021 como se ilustra en la Figura 2 [18].

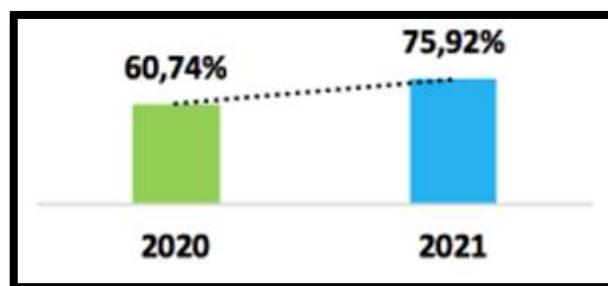


Figura 2. Cobertura de Servicio Móvil 4G con respecto a la población [18]

La implementación exitosa ha permitido que 76 de cada 100 personas tengan acceso al servicio móvil moderno con tecnología de cuarta generación. El gobierno, a través del Ministerio de Telecomunicaciones, pretende continuar aumentando la capacidad,

cobertura y desempeño de la red móvil para satisfacer la ampliación de los servicios móviles de telefonía, asegurando que se alcance los estándares de calidad determinados por las autoridades reguladoras [18].

2.2 Redes satelitales

Los satélites de comunicaciones posibilitan la transmisión de información entre dos puntos que pueden encontrarse en el aire, agua o tierra. Estos satélites ofrecen una amplia gama de servicios, como voz, transferencia de datos, televisión, video, acceso a Internet y transporte de tráfico de redes celulares [19]. La Figura 3 ilustra los servicios que puede proporcionar a través de estos mecanismos de comunicación.

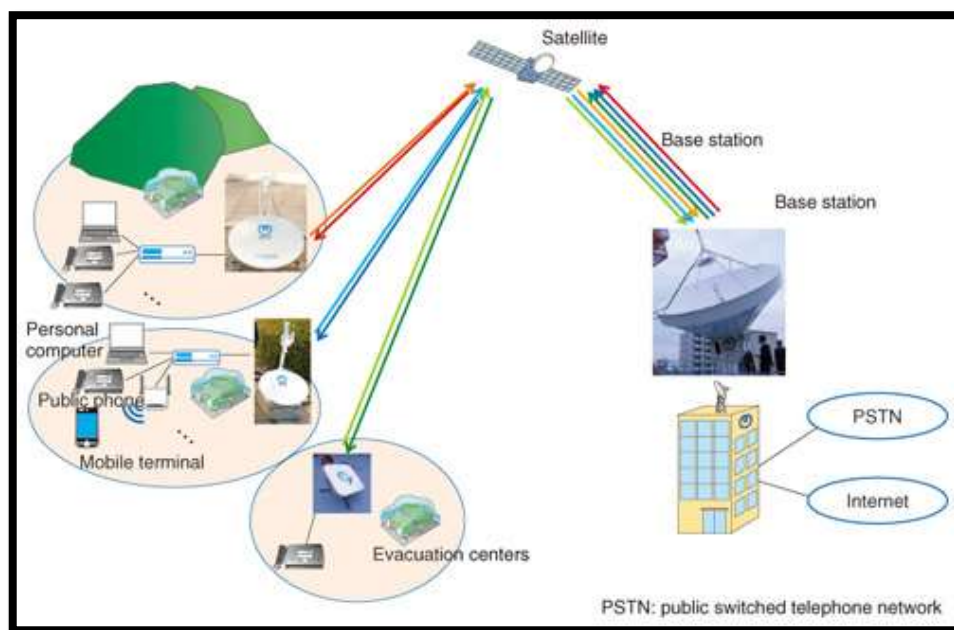


Figura 3. Topología de una red satelital de comunicaciones [19]

2.2.1 Elementos que conforman una red satelital

La antena VSAT (ver Figura 4), con un plato de 1.2 metros de diámetro, está diseñada para cumplir con los requisitos operativos de las bandas KA y KU, permitiéndole recibir comunicaciones en dichas frecuencias. Específicamente diseñada para su uso en el proceso de transmisión satelital DTH (Direct to Home) para la televisión, esta antena parabólica ofrece confiabilidad y rendimiento, adaptándose tanto a entornos residenciales como comerciales. Su frecuencia de operación abarca las siguientes bandas: Ka (26,5 GHz y 40 GHz) y Ku (12–18 GHz) [19].



Figura 4. Antena VSAT para Red Satelital [19]

Un módem satelital, como muestra la Figura 5, es un dispositivo activo que se encarga de modular y demodular las señales de onda que se usan en la transferencia de datos, facilitando el proceso de intercambio a través de satélites. La tecnología de modulación ACM, en contraste con otras que existen en el mercado, presenta una notable superioridad al realizar ajustes automáticos en la modulación y la potencia, asegurando la operatividad continua de la estación VSAT incluso en condiciones climáticas desafiantes.



Figura 5. Modem utilizado para la comunicación Satelital [19]

2.2.2 Tipos de redes satelitales por su arquitectura

La estructura de las redes de acceso mediante satélite se puede clasificar según el tipo de canal de retorno que comprende desde los usuarios hacia la red. En base a este enlace, se destaca un modelo predominante de transmisión y recepción. De esta manera, podemos identificar tres categorías fundamentales de arquitectura de red [20]. Entre estas se

encuentran las redes unidireccionales que carecen de un canal de retorno y solo brindan servicios de difusión, como la distribución de televisión, como indica la Figura 6.

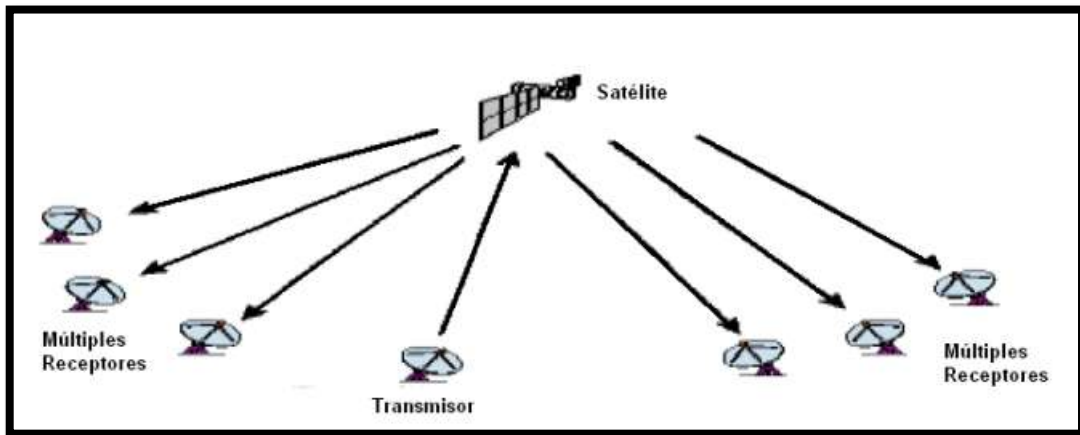


Figura 6. Esquema de Redes Unidireccionales [20]

Las Redes Híbridas son sistemas que incorporan un canal de retorno, lo que posibilita la interacción con la cabecera y el proveedor del servicio. No obstante, el canal de retorno se establece a través de una red distinta a la satelital, típicamente la RDSI (Red digital de servicios integrados). El estándar de transmisión DVB-S brinda soporte a estas redes enfocándose solo en la transmisión a través del enlace satelital. Este tipo de redes permite ofrecer servicios interactivos asimétricos, como la navegación web, especialmente útiles en redes VSAT con capacidades limitadas y terminales sin capacidad de transmisión [20]. Un beneficio clave de los sistemas híbridos es que los terminales son más asequibles y pueden ser instalados por los propios usuarios tal y como se observa en la Figura 7.

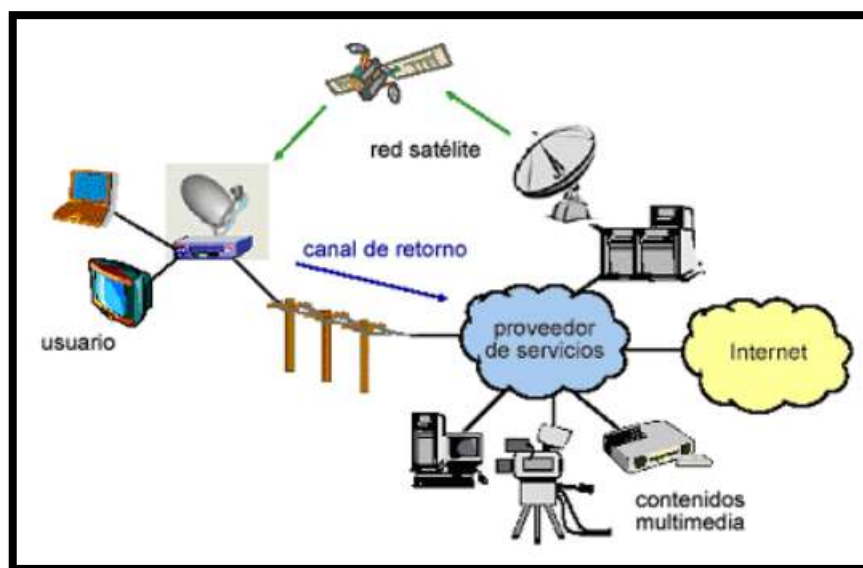


Figura 7. Esquema de una Red Satelital Híbrida [20]

Los sistemas bidireccionales son redes completas que permiten que la comunicación fluya en ambas direcciones a través del satélite. Su uso principal se ha centrado para empresas con múltiples sucursales en la creación de redes privadas virtuales (VPN), especialmente en áreas rurales y de difícil acceso. Inicialmente orientados hacia el mercado empresarial, estos sistemas bidireccionales se han expandido al mercado residencial gracias a la reducción de costos y al interés creciente de los operadores en su implementación. Actualmente, algunas empresas posibilitan los sistemas bidireccionales para usuarios residenciales donde se emplea la misma antena para el servicio de televisión y acceso a Internet. Este enfoque ahora compite con las redes terrestres de ADSL, redes de cable y LMDS [20]. En la Figura 8 se observa un esquema de una red bidireccional vía satélite.

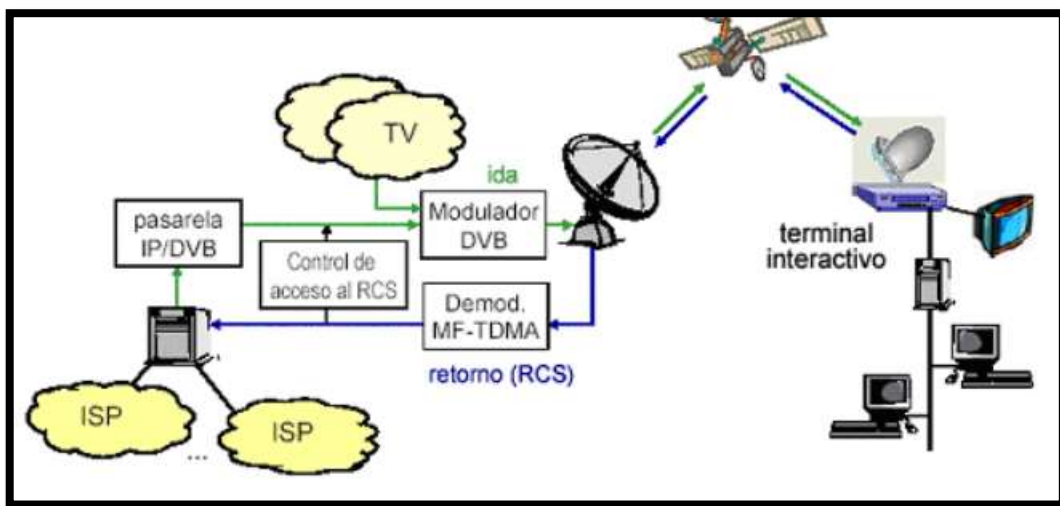


Figura 8. Esquema de una Red Bidireccional [20]

2.3 Vertical HandOver

En las redes de transmisión, el desplazamiento del usuario puede ocasionar un cambio de un Punto de Acceso (AP) a otro, un proceso comúnmente conocido como HandOver (HO), que generalmente implica una carga adicional de señalización de control. La optimización del HandOver involucra la ponderación de diversos factores, incluidos el costo financiero, el consumo de energía, la ubicación y la calidad de servicio del usuario final [21]. La Figura 9 presenta un esquema que ilustra cómo un usuario puede experimentar HandOver al moverse dentro del área de transmisión.

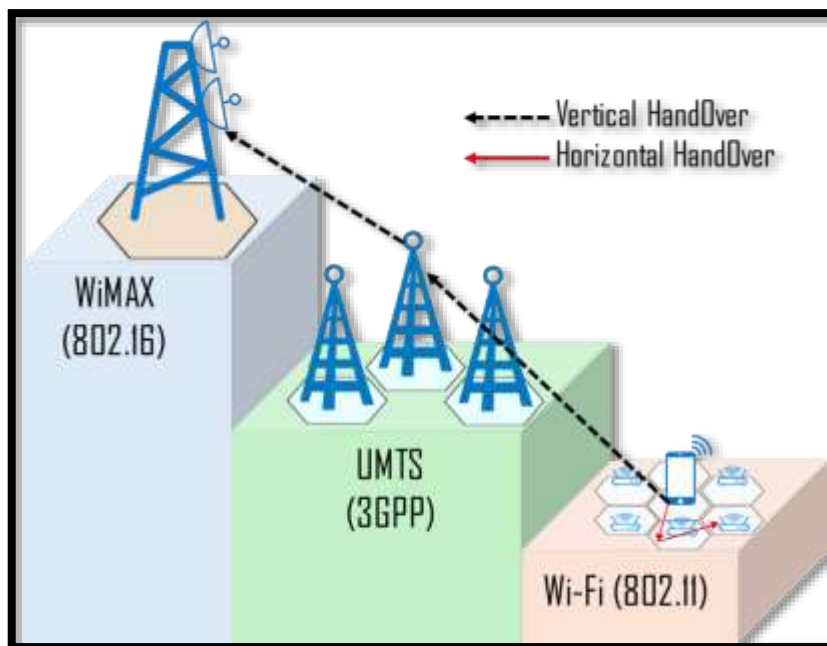


Figura 9. Esquema de Vertical HandOver.

Inicialmente, el HandOver (HO) se implementó en sistemas celulares con el propósito de evitar interrupciones en el servicio causadas por problemas de movilidad. Tradicionalmente, el inicio de un HandOver se basa en mediciones de parámetros físicos, como la intensidad de la señal receptada, lo que garantiza el mantenimiento del servicio a medida que disminuye el nivel de potencia de un Punto de Acceso (AP) servidor. Para lograr esto, se prefiere un mecanismo de HandOver sin fisuras que asegure la continuidad de la conectividad del servicio sin interrupciones mientras un usuario se desplaza de un AP a otro [21].

2.3.1 Importancia de conexión en redes heterogéneas

Para hacer frente al crecimiento exponencial del tráfico, una solución es la implementación de redes heterogéneas, las cuales buscan aumentar la capacidad del sistema celular mediante la introducción de celdas pequeñas, como picoceldas o femtoceldas, en conjunto con estaciones macro. Cada celda pequeña proporciona una capacidad significativa por usuario en su área de cobertura [22]. La conjunción de estaciones macro y celdas pequeñas se denomina red heterogénea, como se muestra en la Figura 10.

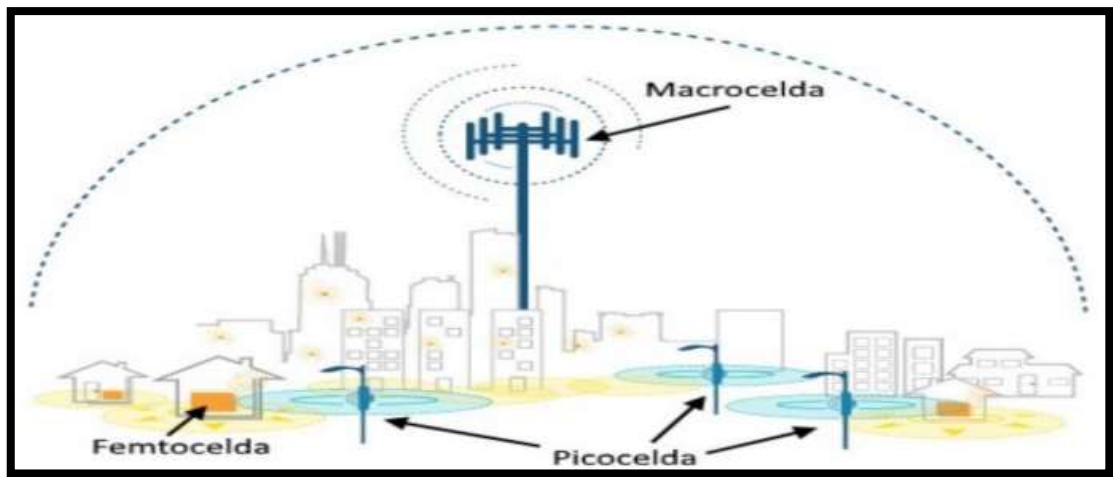


Figura 10. Esquema de una red Heterogénea [22]

Los elementos ilustrados cumplen con funciones similares en distintos niveles de cobertura y alcance, es así como las femtoceldas son responsables de suministrar alta calidad del servicio celular en ambiente residencial no mayor a 10 metros, mientras que, las picoceldas extienden la cobertura de los servicios para ambientes empresariales o edificaciones grandes ya que pueden alcanzar hasta los 200 metros. Las macroceldas constituidas por estaciones de gran tamaño y alta potencia que cubren extensas áreas como ciudades o distritos para proveer servicio celular a gran cantidad de usuarios. Las femtoceldas y picoceldas permiten que el envío y recepción de sistemas móviles pueda ejecutarse a través de conexiones de banda ancha local, permitiendo que el consumo de recursos de la macrocelda sea redistribuido para el resto de los usuarios [23].

Las pequeñas celdas se integran de manera eficaz, permitiendo la provisión de servicios de banda ancha para un elevado número de usuarios. Normalmente se despliegan en áreas con cobertura limitada de macroceldas y una alta demanda de tráfico, como centros comerciales, parques y aeropuertos. Estas celdas pequeñas, cuando se combinan con las macroceldas, ofrecen beneficios significativos, que incluyen una mayor capacidad y cobertura en áreas urbanas e interiores. Además, posibilitan reutilizar del espectro mediante el empleo de estaciones base más pequeñas, generando considerables ahorros para el operador al reducir costos de equipamiento, energía y mantenimiento [22].

2.3.2 Toma de decisiones en vertical HandOver

El HandOver es un proceso que mantiene el terminal móvil conectado a la red cuando hay un cambio de conexión de una estación base a otra debido al movimiento. Este proceso varía cuando el nodo se encuentra en modo inactivo (idle mode), sin transmisión de datos, o en modo activo (connected mode), cuando el usuario está utilizando servicios de la red. La red controla y asiste el proceso de HandOver, que se basa en mediciones realizadas por el terminal de la intensidad y calidad de señales de referencia específicas del enlace de bajada de la estación base servidora (S-BS) y estaciones base vecinas [24].

Se pueden distinguir varios tipos de HandOver. El intra e inter-frecuencia que se da cuando la S-BS y la estación base objetivo (T-BS) operan con una frecuencia de portadora igual o distinta, respectivamente. También se da el intra-capa celular, que son traslados entre celdas del mismo tipo, como macroceldas. Cuando se lleva a cabo este proceso con celdas de igual tecnología con la red de un mismo operador se lo denomina como intra-tecnología celular e intra-operador [24].

Para conseguir que la selección de red sea correcta se requiere de una toma de decisiones por parte del dispositivo de conexión. Para aplicar una técnica de aprendizaje supervisado se requiere la disposición de una cantidad suficiente de datos con etiquetas para la variable predictiva durante la generación de modelos con árboles de decisión. La calidad del aprendizaje del algoritmo mejora a medida que se dispone de un conjunto de datos etiquetados más extenso. El conjunto de entrenamiento abarca un aproximado de ochenta por ciento del total de datos y se lo utiliza para la construcción del modelo mientras que el restante veinte por ciento se utiliza para evaluar la confiabilidad y se lo denomina conjunto de prueba [24].

Los árboles de decisión se consideran como un algoritmo de clasificación dentro del aprendizaje supervisado, pueden generar una función de salida con valores discretos. Este método se destaca por su simplicidad en el análisis e interpretación, a menudo visualizado como un diagrama de flujo, aunque posee diferencias importantes. La aplicación más común de este método es el modelo predictivo para ejecutar o no una actividad condicionada a parámetros de entrada. En el esquema, la raíz representa el nivel más alto, del cual surgen ramas con criterios diferenciados. Estas ramas, según sea necesario, proporcionan valores discretos basados en la variable bajo análisis [24].

2.4 Algoritmos de predicción en redes móviles

El conjunto de procesos y técnicas requeridas al llevar a cabo la toma de decisiones, para ejecutar o no el cambio de red durante el proceso de HandOver, tiene como base los denominados algoritmos de predicción. Estos recolectan los datos de la nueva red para procesarlos y poder predecir si es conveniente realizar un nuevo enlace, sin embargo, existen redes que no proporcionan todos los parámetros debido a restricciones de la misma red u otros factores, por lo tanto, los algoritmos predictivos deben tener una alta capacidad de adaptación para casos donde no se cuenta con la información completa [25].

Durante el proceso de HandOver se consideran algunos factores como son las políticas, sistemas de control y criterios de decisión, este último comprende tanto las preferencias del usuario, condiciones de red, necesidades de las aplicaciones y la capacidad del terminal. Por medio del algoritmo se evalúan y priorizan para llevar a cabo el HandOver vertical o cambio de red de distinta tecnología, como es el caso de las redes móviles y satelitales. Algunas técnicas ocupadas para ejecutar el HandOver vertical son lógica difusa, redes neuronales, esquemas Policy-Enabled y algoritmos avanzados como Context-Aware, entre otros más [4].

Todo algoritmo de predicción contempla tres fases esenciales:

1. Inspección del sistema o red, comprende desde el monitoreo y la medición de las redes utilizables en el entorno considerando los parámetros estáticos y dinámicos.
2. Toma de decisión con relación al HandOver, es decir, se analizan y procesan todas las características para establecer una decisión.
3. Ejecución del HandOver, de acuerdo con la decisión obtenida en la etapa anterior, se realiza un cambio en la conectividad hacia una nueva red o se mantiene el dispositivo conectado a la actual.

Existen algoritmos que resumen estas tres fases en sólo dos, Inicio del HandOver y Ejecución del HandOver, sin embargo, en su desarrollo incluyen todos los aspectos detallados en las tres etapas indicadas [4].

A continuación, se detallan algunos tipos de algoritmos de acuerdo con los criterios o técnicas que emplea cada uno para ejecutar el HandOver.

2.4.1 Algoritmos basados en características de decisión

Los algoritmos que se basan exclusivamente en la fuerza de la señal son simples de implementar gracias a su único criterio como es el caso del HandOver horizontal. No obstante, estos algoritmos solo son efectivos para iniciar el proceso, ya que son muy sensibles a los cambios. Si encuentran una red con una señal más fuerte, activan un nuevo HandOver. Un ejemplo representativo de este enfoque es el algoritmo de "mayor potencial", que realiza un cambio a la red que tenga la fuerza de señal más alta, suponiendo como resultado una pérdida de paquetes reducida. Sin embargo, no considera que se produce un efecto ping-pong que no es favorable [25].

El efecto ping-pong se refiere a la ejecución de HandOvers innecesarios, lo que aumenta la tasa de estos procesos (repeticiones que ocurren durante una sesión de datos). Varios autores han intentado reducir este efecto, utilizando umbrales. Contrariamente, en la patente [26], se emplea la interferencia señal-ruido recibida (RSNI). Todas las propuestas relacionadas al tema buscan disminuir el número de HandOvers innecesarios [25].

Por otro lado, los algoritmos que se fundamentan en el ancho de banda operan con base al criterio de seleccionar las redes que ofrezcan un mayor ancho de banda con el objetivo de mejorar el rendimiento en HandOvers verticales. Esto se evidencia en propuestas que muestran una permuta vertical suave, y otras en donde el algoritmo de toma de decisiones está basado en el ancho de banda diseñado para redes de Vehicular Ad hoc Networks (VANET) [25].

2.4.2 Algoritmos basados en inteligencia artificial

2.4.2.1 Redes neuronales

Las redes neuronales han sido empleadas en el contexto de HandOvers para abordar la toma de decisiones en redes heterogéneas. Existen redes neuronales artificiales con retro propagación que utilizan parámetros de entrada como la fuerza de la señal recibida (RSS) y la intensidad del tráfico en las redes objetivo. Aunque esta propuesta supervisa el entrenamiento de la red, se destaca como problema el retardo causado por esta etapa de entrenamiento. En otros casos, se puede introducir un Middleware establecido mediante una red neuronal artificial para optar por la mejor red de acuerdo con las preferencias del usuario, considerando que el tamaño de los paquetes de señalización y el tiempo de entrenamiento provoquen un incremento de latencia durante el HandOver.

Finalmente existen redes neuronales con parámetros de entrada como la intensidad de la señal recibida (RSSI) y la velocidad del dispositivo móvil, con el objetivo de reducir el número de HandOvers innecesarios [25].

Las redes multicapa representan un modelo estructurado por varias capas de neuronas conectadas donde la salida que produce una capa representa la entrada de la siguiente capa. La característica principal de este tipo es que pueden existir varios niveles de capas intermedias u ocultas para realizar los procesos de clasificación y regresión, por lo tanto, será el modelo a implementar en el presente trabajo ya que es uno de los más utilizados en el ámbito de aprendizaje automático donde la entrada y salida no tienen relación lineal o directa [27].

La retro programación es un método de entrenamiento supervisado de redes neuronales que permite ir ajustando los valores asignados a las interconexiones neuronales para reducir el error de predicción. De manera general, este proceso se basa en la regla de la cadena donde la razón de cambio de una función compuesta se expresa en términos de las razones de cambio de cada uno de sus componentes [28]. En este estudio se diferencian dos métodos de reprogramación de acuerdo con los criterios de estimación del error:

- Regularización bayesiana. El cálculo del error se basa en la suma de cuadrados, el cual se busca reducir mediante una combinación lineal entre los pesos de cada interconexión. Al estar basado en el algoritmo de Levenberg-Marquardt, el cálculo del jacobiano se obtiene a partir de las variables de peso y sesgo, por lo que puede requerir más tiempo de ejecución, pero brinda mejores resultados cuando los conjuntos de datos son complejos, reducidos o con ruido [29], la explicación detallada se encuentra en el Anexo A.
- Gradiente conjugado escalado. Este método pretende encontrar un vector de dirección en función del gradiente, la entrada y los pesos, utilizando la información actual y las de iteraciones anteriores, de este modo se evita el planteamiento de matrices y se reformula en función de derivadas. Por esta razón, es aplicable siempre y cuando las funciones que intervienen posean derivadas [28], la explicación detallada se encuentra en el Anexo B.

2.4.2.2 Lógica difusa

Los algoritmos de HandOver vertical enfrentan diversos factores, complicando la cuantificación en algunos de ellos. La lógica difusa se presenta como una solución para abordar problemas de toma de decisiones en cambios de red, especialmente cuando los parámetros involucrados pueden ser representados mediante esta lógica. Varios estudios proponen el uso de políticas basadas en lógica difusa para el proceso de decisión en HandOvers verticales [25]. Estas propuestas buscan también lograr un equilibrio eficiente de carga en las redes al emplear parámetros de entrada como es el caso de la fuerza de la señal recibida (RSSI), la latencia y la tasa de datos [25].

2.4.2.3 KNN más cercanos

También se pueden utilizar los datos históricos de HandOver para anticipar cambios de red mediante el algoritmo de los k vecinos más cercanos (KNN) en redes vehiculares. Esto se basa en la premisa de que el movimiento regular de los automóviles sigue un patrón aproximadamente lineal con curvas finitas, lo que genera cierta disciplina en los HandOvers de red. El clasificador KNN utiliza tres parámetros como son la posición del vehículo, la red seleccionada y el punto de cambio para establecer la distancia más corta para ejecutar el HandOver empleando el método euclidiano entre los dos puntos. Este enfoque permite anticipar cambios de red, agilizando el proceso [25].

Una propuesta similar utiliza la técnica de KNN para optar por la estación base (eNB) durante el HandOver en redes ultradensas con entornos vehiculares. Además de la posición y la red seleccionada, se incorporan características adicionales en el clasificador, como el ángulo azimutal y la velocidad del nodo móvil (NM). Un parámetro esencial para el proceso de decisión es la velocidad debido a que su impacto es directo en la calidad del servicio (QoS) [25].

2.5 Parámetros de evaluación de redes de comunicación

El entorno de la red de telefonía celular es altamente dinámico y está sujeto a diversas variaciones en las condiciones operativas, influidas por factores como el clima, la capacidad de cobertura y tráfico en sectores específicos, así como interferencias presentes. El sistema de radiofrecuencia debe ser capaz de gestionar la conectividad para un gran número de usuarios, adaptándose a las necesidades individuales de cada uno. Esto implica no solo soportar una carga significativa en términos de cantidad, sino también

ofrecer una experiencia satisfactoria en todos los servicios disponibles, incluyendo voz y datos en diversas aplicaciones. La evaluación del servicio es a través de varios parámetros, destacando la calidad de servicio (QoS) como uno de los indicadores más importantes para medir la satisfacción del usuario. La calidad percibida respecto al servicio juega un papel crucial en el crecimiento o debilitamiento del negocio [30].

Encontrar una calidad de servicio adecuada donde los usuarios la requieran representa un desafío significativo en la actualidad. Dado el uso extendido de smartphones, la movilidad se ha vuelto esencial, exigiendo la prestación de servicios eficientes independientemente de la ubicación del usuario en el momento de utilizar los servicios ofrecidos por los sistemas móviles de comunicación. Para medir la calidad del enlace se emplean diversos parámetros entre los principales están los siguientes:

- La Potencia de Señal Recibida de Referencia (RSRP) es una medida que implica tomar el promedio de la fuerza de la señal recibida de una antena. Esta métrica resulta valiosa para analizar y tomar decisiones en los procesos de reelección entre celdas, especialmente en situaciones de HandOver. El RSRP se expresa como la potencia promedio lineal recibida, medida en vatios [30].
- La Calidad de la Señal Recibida de Referencia (RSRQ) es una medida que se basa en una evaluación de la calidad recibida de un sector específico de una estación base, considerando el ancho de banda. Esta característica es crucial en la toma de decisiones durante los procesos de reelección entre celdas, conocidos como HandOver, especialmente cuando la potencia no proporciona la información suficiente para realizar dichos cambios de estado en los dispositivos de usuario [30].
- El Indicador de Calidad de Canal (CQI) es un marcador que contiene datos que indican el nivel de rendimiento. Utilizando un intervalo de observación que no está limitado en tiempo ni frecuencia, el Equipo de Usuario (UE) determinará, para cada valor de CQI informado en una subtrama del enlace ascendente, el índice CQI más alto, que varía de 1 a 15 [30].
- RSSI, que significa Indicador de Intensidad de Señal Recibida, hace referencia a la fuerza de la señal detectada por un dispositivo de usuario. Esta potencia se adapta respecto al ancho de banda del canal y representa la suma total de potencia en comparación con la interferencia y el ruido térmico [30].

- RS-SINR, que significa Relación Señal a Ruido e Interferencia de la Señal de Referencia, representa el promedio lineal de la potencia en vatios en los bloques de recursos que contienen las señales patrón específicas de la celda. Esto se calcula considerando tanto la potencia de ruido como la potencia de interferencia sobre los dispositivos de recursos que transportan esas señales patrón en el mismo ancho de banda. Cuando el equipo de usuario emplea diversidad de receptores, el valor no será inferior al RS-SINR de referencia de cualquiera de las ramas de diversidad individuales [30].

CAPITULO III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

El presente proyecto se lleva a cabo mediante una investigación de tipo descriptiva. Este enfoque metodológico se centra en describir de manera detallada las características y propiedades del sistema de telefonía celular y satelital, evaluando parámetros como la latencia, BER, SNR, nivel de señal y la influencia de factores externos como la distancia de movimiento en la conectividad. La investigación descriptiva permite una comprensión profunda de cómo la dinámica de la red de telefonía celular y satelital se ve afectada por estos factores y cómo estos influyen en la experiencia del usuario.

Además, se incorpora un enfoque exploratorio en la investigación para abordar aspectos menos conocidos o explorar nuevas posibilidades dentro del ámbito de la movilidad y conectividad en redes celulares y satelitales. Este componente exploratorio permite identificar patrones, relaciones y tendencias emergentes en el comportamiento de la red, proporcionando perspectivas valiosas para la toma de decisiones y posiblemente generando hipótesis que podrían ser objeto de investigaciones futuras. En conjunto, la combinación de investigación descriptiva y exploratoria contribuye a una comprensión integral del funcionamiento de la red de telefonía celular y sus interacciones con factores externos.

3.2 Diseño de investigación

El enfoque de investigación de este proyecto es principalmente cuantitativo y experimental, ya que pretende medir y analizar de manera precisa y sistemática los parámetros de rendimiento de las redes 4G LTE y Satelitales bajo diferentes condiciones de movimiento de un dispositivo móvil. Este enfoque cuantitativo permite una recolección de datos mediante la simulación de redes de comunicación, mientras que el componente experimental proporciona un entorno controlado para simular las condiciones de operación y de esta manera evaluar la efectividad del algoritmo predictivo en la selección de la mejor conexión. La combinación de ambos enfoques asegura un análisis amplio y una validación correcta del modelo propuesto.

3.3 Técnicas de recolección de Datos

Las técnicas de recolección de datos en este proyecto se dividen en primarias y secundarias para cumplir con los objetivos planteados. Primero, se realiza un análisis

exhaustivo de la bibliografía y la información existente sobre algoritmos que facilitan el procedimiento de Vertical HandOver, lo que constituye una fuente de datos secundaria. Esta revisión bibliográfica permite identificar los enfoques y técnicas más eficaces y establecer una base teórica sólida. En cuanto a la recolección de datos primarios, se realiza una simulación en Simulink de sistema de comunicación 4G LTE y de un sistema satelital para recopilar información o parámetros de calidad en la transmisión como nivel de señal, latencia, distancia respecto al dispositivo, SNR y BER en diferentes condiciones de movimiento del receptor. Estos datos son indispensables para diseñar e implementar un modelo predictivo de aprendizaje automático basado en redes neuronales, que pueda pronosticar el rendimiento de las condiciones de las redes y seleccionar la mejor calidad de conexión. Finalmente, se efectúan pruebas, evaluación y optimización del algoritmo propuesto para asegurar su precisión y eficacia en entornos reales.

3.4 Población de estudio y tamaño de muestra

3.4.1 Población de estudio

La población de estudio en este proyecto se compone de 2 posibles escenarios de conexión en redes 4G LTE y satelitales, tomando en cuenta una variación de distancia de 0 a 12KM que es la cobertura máxima de operación de ambas redes en un nodo, considerando las variaciones de los parámetros de nivel de señal, latencia, SNR y BER. Esta población incluye un amplio rango de distancia que permite relacionar la investigación en el uso real, considerando el dispositivo en movimiento en varias distancias lo que tiene una relación directa con las variaciones en la calidad de señal debido a factores técnicos propios de las redes de comunicación. Al enfocar la investigación en estos parámetros, se pretende cubrir una representación total de las condiciones que afectan el rendimiento de estas redes en un entorno real.

3.4.2 Tamaño de la muestra

Para generar una base de datos representativa de la población de estudio, se genera 3000 pruebas experimentales. En estas pruebas, se varía sistemáticamente la distancia del dispositivo receptor desde 200 metros hasta 12000 metros, incrementando en intervalos de 200 metros, lo que da como resultando 60 escenarios distintos de distancias. En cada uno de estos escenarios, se realiza 50 pruebas para capturar variaciones y garantizar la calidad de los datos. Esta muestra permite entrenar y validar el modelo predictivo basado en redes neuronales con un conjunto de datos amplio en donde se observa adecuadamente

las variaciones y desafíos del Vertical HandOver en un entorno real de redes heterogéneas.

3.5 Hipótesis de ser el caso

El uso de un modelo predictivo basado en redes neuronales, entrenado con datos de calidad de señal recolectados mediante simulación, en cual se varía distancia, permite una selección precisa y efectiva de la mejor red de conexión entre 4G LTE y satelital.

3.6 Operacionalización de variables

Tabla 1. Variables Involucradas en el problema de investigación

| Variable independiente | | | |
|-------------------------------|---|--|---|
| Variable | Concepto | Indicadores | Técnica e Instrumento |
| Distancia con el Móvil | Distancia en la que se encuentra el dispositivo con respecto al Sistema de Comunicación | <ul style="list-style-type: none"> - Distancia 4G - Distancia Enlace Satelital | <ul style="list-style-type: none"> - Computador - Matlab / Simulink |
| Variable dependiente | | | |
| Variable | Concepto | Indicadores | Técnica e Instrumento |
| Calidad de Señal | Calidad que tiene el Sistema de Comunicación para Conectarse a una u otra Red. | <ul style="list-style-type: none"> - SNR - BER - Latencia - Nivel de Señal | <ul style="list-style-type: none"> - Recopilación de datos - Simulink / Matlab - Ordenador |

3.7 Métodos de análisis y procesamiento de datos

3.7.1 Métodos de análisis

Dividir los datos en Entrenamiento y Prueba: Se divide el conjunto de datos obtenidos en dos partes: uno para entrenar el modelo (conjunto de entrenamiento) y otro para

evaluar su rendimiento (conjunto de prueba). Para este caso se realiza una relación de 70% para entrenamiento y 30% para prueba.

Selección de Modelo: Se realiza el diseño del sistema de redes neuronales como modelo predictivo principal. Se decide la arquitectura adecuada (número de capas, neuronas por capa, funciones de activación) en función de la complejidad de los datos.

3.7.2 Procesamiento de los datos

Entrenamiento del Modelo: Entrenar el modelo utilizando el conjunto de entrenamiento. Optimizar los hiperparámetros como tasa de aprendizaje, número de épocas, tamaño del batch para mejorar el rendimiento del modelo.

Métricas de Rendimiento: Se utiliza métricas como la precisión, recall, F1-score y el área bajo la curva ROC para evaluar la efectividad del modelo en el conjunto de prueba.

Comparación de Redes: Analizar el desempeño del modelo predictivo en la selección de la red 4G LTE o satelital en función de las condiciones simuladas.

3.8 Diseño del Sistema Predictivo

Para la implementación del sistema de comunicación satelital y 4G, se ha tomado las etapas que se muestran en el diagrama de bloques de la Figura 11. En primer lugar, se lleva a cabo una revisión profunda de la literatura relacionada con handovers, calidad de servicio en redes celulares y satelitales, algoritmos predictivos y tecnologías móviles, integrando estos conocimientos en un marco teórico sólido. Posteriormente se procede a la recopilación de datos para obtener información de handovers y otros parámetros relevantes de calidad de servicio.

Una vez obtenida esta información se desarrolla los sistemas de comunicación mediante la estructura básica que compone tanto un sistema satelital como 4G, así como del algoritmo de vertical handover en MATLAB basado en Redes Neuronales y Clasificación, mismo que contiene la información obtenida con anterioridad para así predecir el cambio de red entre las diferentes señales heterogéneas. Se realiza un sistema de pruebas mediante Simulink para poder generar los diferentes escenarios de evaluación del clasificador.

La validación del modelo se realiza mediante pruebas en diferentes situaciones donde se pueda asegurar el funcionamiento del algoritmo en situaciones reales a partir de datos como Nivel de la Señal, Latencia, SNR y BER. Finalmente se efectúa la evaluación de

resultados y el análisis, considerando la calidad de servicio del usuario que se puede ofrecer al usuario. Finalmente, se documenta y presentan los resultados obtenidos realizando las respectivas conclusiones y posibles trabajos futuros de la investigación.

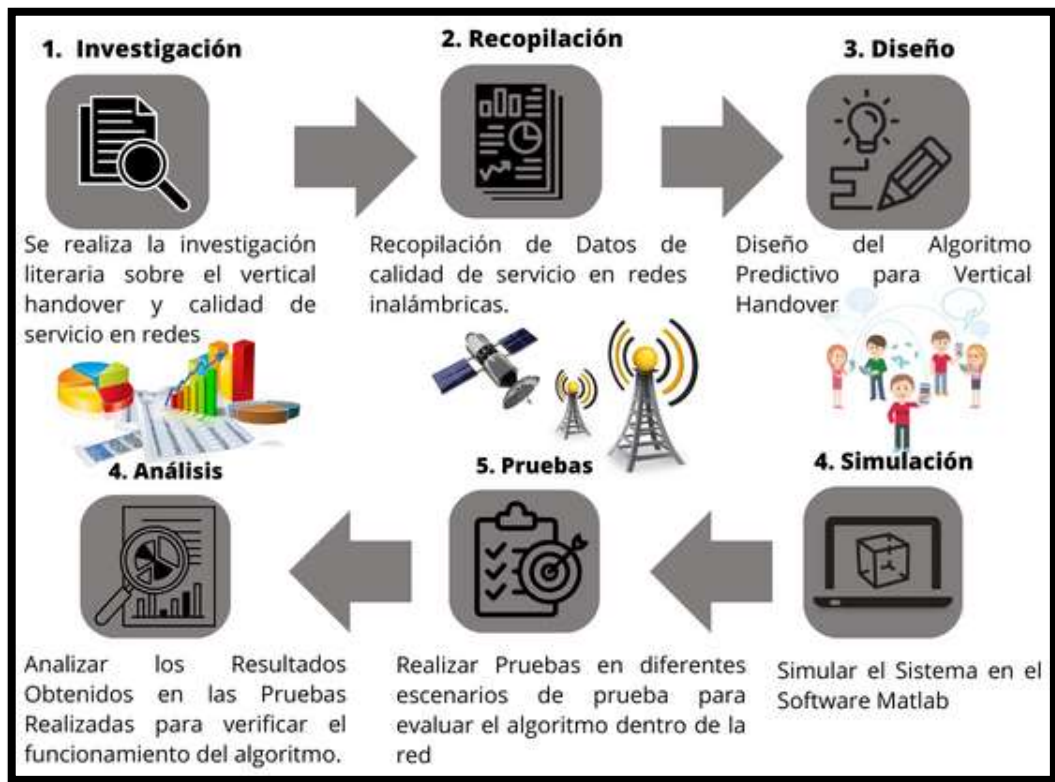


Figura 11. Diagrama de Bloques de la Investigación

3.8.1 Sistema de Comunicación Satelital

El satélite Jupiter 3, el cual se analiza en este sistema de comunicación es un dispositivo de Ultra Alta – Densidad (UHDS) perteneciente a la empresa HUGHES el cual está diseñado para brindar servicio y soporte de internet a redes móviles, empresariales, marítimas, aéreas y comunitarias en el Norte y Sur de América [31]. Las características principales de este satélite se las puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Características Relevantes del Satélite Jupiter 3 [31]

| Características | Especificaciones |
|-----------------|-------------------------|
| Espectro | Banda Ka, Q, V |
| Cobertura | América del Sur y Norte |

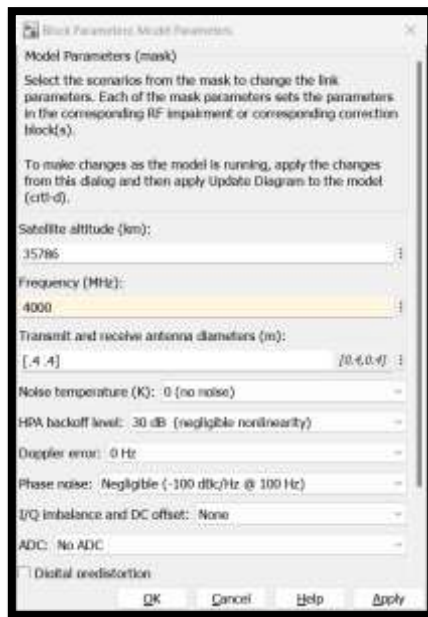


Figura 13. Parámetros del Modelo Satelital Júpiter 3

Para el transmisor satelital, se requieren de 3 bloques principales; siendo el primero el bloque de modulación, mismo que permite a la señal asignar el flujo de los datos en puntos dentro de un plano, que para este ejemplo es 16QAM, lo que permitirá posteriormente que esto datos se demodulen y se pierda la menor cantidad de información.

También se tiene el bloque de *Filtro Square Root*, el cual permite sobremuestrear y dar forma a la señal previamente modulada utilizando la forma de pulso coseno elevado de raíz cuadrada. Posteriormente se realiza una Amplificación de Potencia mediante el bloque *HPA Nonlinearity* el cual modela a un amplificador de onda viajera (TWTA) y corrige la Amplitud y Fase mediante un bloque de predistorsión digital.

Finalmente, se tiene un bloque de Ganancia Constante, el cual representa la ganancia de la antena parabólica del transmisor. En la Figura 14, se puede observar los bloques correspondientes al transmisor satelital diseñado.

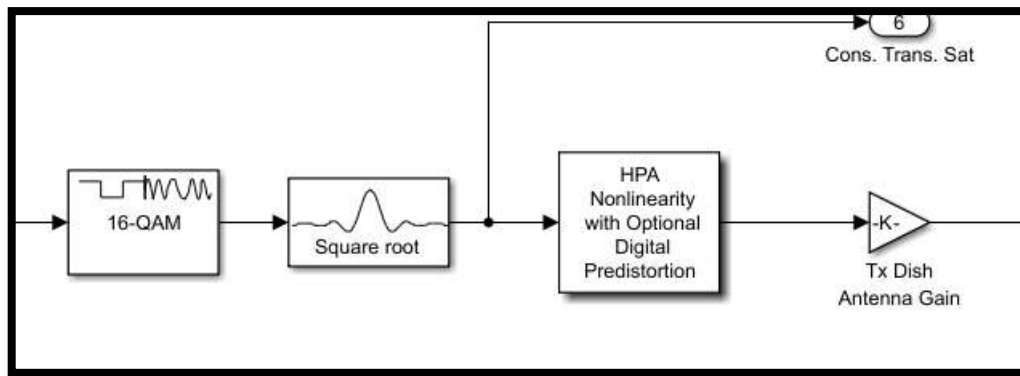


Figura 14. Bloques del Transmisor Satelital

Posteriormente, se procede a modelar el canal de transmisión que utiliza el sistema satelital, dentro del cual se ubican dos bloques principales; *Free Space Path Loss* o Pérdida de Ruta en Espacio Libre, mismo que permite atenuar la señal proveniente del transmisor mediante una función que representa el espacio libre y en donde se indican los parámetros de frecuencia y distancia del satélite. Posteriormente se ubica el bloque de *Doppler Error*, mismo que genera el efecto Doppler o Desvanecimiento el cual gira la señal recibida para simular este efecto del enlace. En la Figura 15 se puede observar los bloques correspondientes al canal de transmisión del enlace satelital.

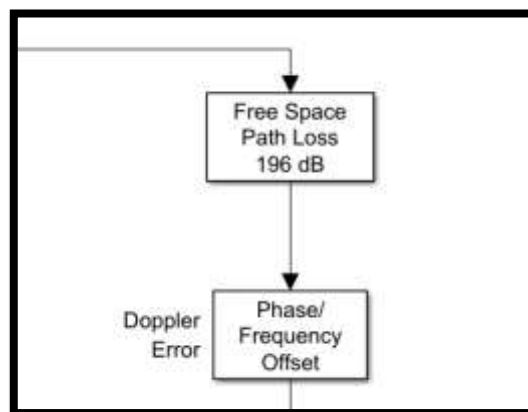


Figura 15. Canal de Transmisión Satelital

Una vez recibida la señal por el canal de transmisión, este ingresa al sistema de recepción, mismo que consta de varios bloques que permiten modular, corregir los errores de la transmisión y filtrar cierto ruido propio del enlace. Dentro de estos bloques se encuentra el Filtro *Square Root*, mismo que aplica un filtro coseno elevado a la señal recibida para reducir la mayor cantidad de ruido. Después se genera un Ruido Térmico y un Ruido de Fase en el Receptor, lo cuales se representan por *Bipolar ADC*, *AGC* y *DC Blocking*, los

cuales agregan ruido gaussiano representando la temperatura a la que se encuentra el sistema del receptor e introducen perturbaciones de fase aleatorias que producen un parpadeo de fase en el sistema. Para corregir estas señales propias de este tipo de enlace se utiliza el bloque *I/Q Imbalance Correction*, el cual elimina de la señal el desbalance o desequilibrio de amplitud o fase según la necesidad del sistema mediante algoritmos adaptativos.

Posteriormente la señal recibida ingresa al bloque *Doppler Correction*, mismo que utiliza un bloque de sincronización de portadora para compensar el desplazamiento de frecuencia ocasiona por el efecto Doppler suscitado dentro del canal de transmisión. Finalmente, se procede a la demodulación de la señal mediante el bloque *16 QAM Demodulador*, en donde se selecciona los puntos de constelación a ser demodulados y se obtiene finalmente los datos recibidos. En la Figura 16 se puede observar los bloques que representan al sistema de recepción satelital.

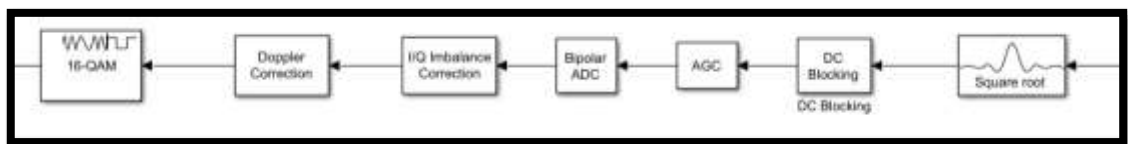


Figura 16. Receptor Satelital

Para comprobar el funcionamiento del sistema satelital en conjunto, se procede a observar el comportamiento del diagrama de constelación transmitida y recibida. En la Figura 17 (a) que se encuentra en azul, se puede observar la constelación 16 QAM observada desde el transmisor es decir previo al ingreso al canal de comunicación, mientras que en la Figura 17 (b) se observa la constelación recibida en el receptor satelital previo a la demodulación y con todas las correcciones efectuadas. Se identifica que ambas señales tienen los mismos rasgos lo cual indica que los datos recibidos con los transmitidos tienen consistencia, es decir que la transmisión de la información se realiza de manera correcta, con una única ligera diferencia de potencia lo cual corresponde a las amplificaciones realizadas en el transcurso del sistema.

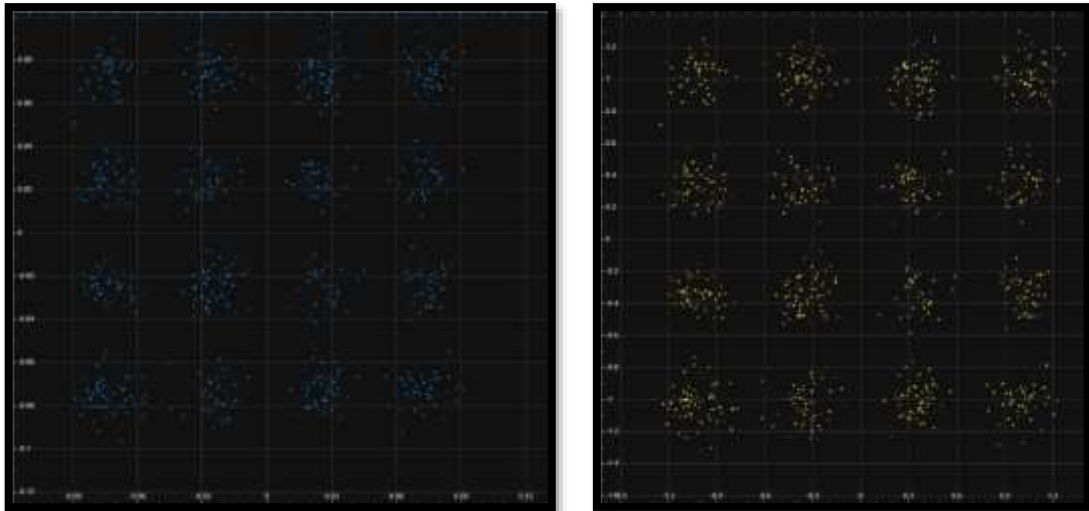


Figura 17. Constelación 16 QAM (a) Transmitida – Azul (b) Recibida – Amarilla

Finalmente, se observa el comportamiento en frecuencia de la señal satelital recibida en la Figura 18, en donde se tiene un rango ancho de banda que de 20 kHz a -160 dbm como componente principal en frecuencia de los datos.

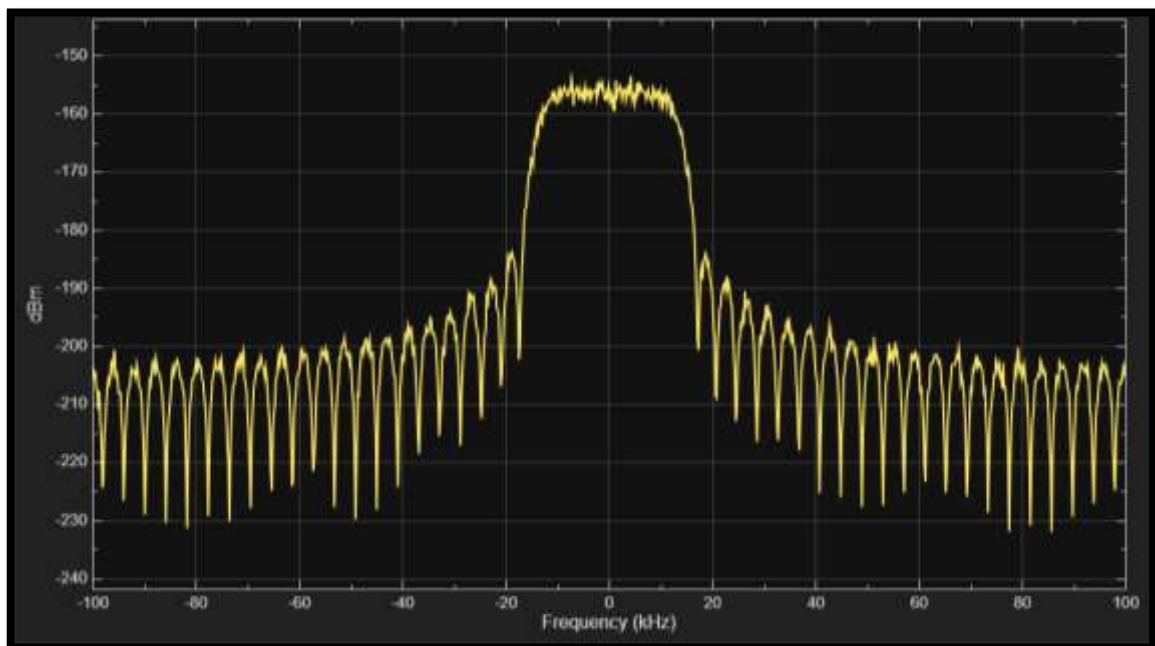


Figura 18. Señal Recibida en Frecuencia del Sistema Satelital

3.8.2 Sistema de Comunicación 4G

De la misma manera que para un enlace satelital, un enlace 4G se compone de una serie de bloques que permiten generar la transmisión y recepción de una señal mediante un canal. Para esto dentro Simulink se muestra el diagrama de bloques que se observa en la

Figura 19, misma que se encuentra basada en un transmisor y receptor OFDM para una entrada única y el cual es esencial para sistemas 4G LTE, 5G, WLAN [33].

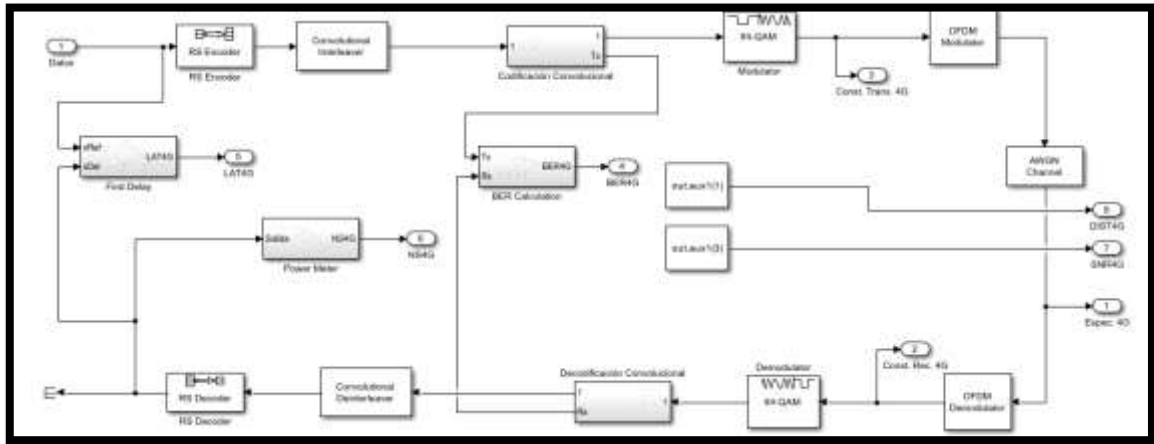


Figura 19. Diagrama de Bloques del Sistema de Comunicación 4G

Como primer paso para implementar una red 4G LTE, se requiere de un bloque de codificación Red Solomon (*RS Encoder*) el cual es el encargado de transformar los datos en símbolos codificados en números enteros basados en un polinomio primitivo y una determinada longitud de palabra [34], siendo su función principal la corrección de errores de símbolo durante el envío de información por el canal. Posteriormente, se realiza un *Convolutional Interleaver*, el cual consiste en intercalar el conjunto de símbolos ingresados, reorganizándolos sin repetir ni omitir ninguno del conjunto creado. La asignación de estos símbolos se basa en una convolución la cual será fija dependiendo de la cantidad de términos de esta [35].

Se aplica una *Codificación Convolutiva*, la cual permite el control de errores con una memoria, lo cual dependerá del conjunto de símbolos ordenados por el bloque anterior y el cual se rige a un polinomio característico para la identificación de los bits errados [36]. Una vez establecida las codificaciones correspondientes de los datos, se procede a la modulación respectiva de cada uno de los símbolos convolucionales, esto se realiza mediante el bloque *64 QAM Modulator*, el cual permite colocar en un plano el conjunto de símbolos creados por el codificador, siendo para este caso 64 puntos la constelación correspondiente [37].

Finalmente, para poder implementar de manera correcta un sistema 4G LTE, se requiere una Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (*OFDM Modulator*), el cual genera múltiples subportadoras para que los datos sean transmitidos de manera eficiente

y con un ancho de banda mayor. Dentro de este bloque se especifica parámetros como la cantidad de puntos de la FFT, el cual permite identificar cada una de las frecuencias subportadoras de los datos [38]. En la Figura 20 se puede observar el diagrama de bloques correspondiente al Transmisor 4G LTE con los respectivos bloques mencionados.

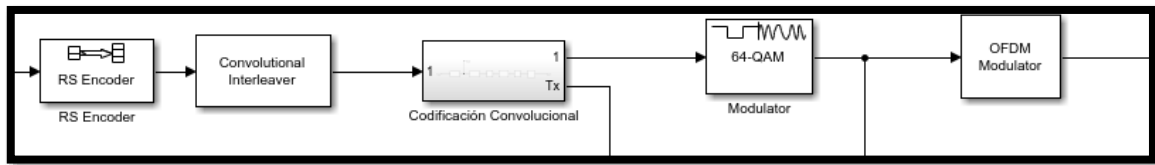


Figura 20. Bloques Correspondientes al Transmisor 4G LTE

Al ser una señal móvil, se requiere agregar un canal de comunicación de tipo AWGN, el cual corresponde a un generador de Ruido Gaussiano. Dentro de este bloque se ajusta la codificación para aplicar una Relación Señal Ruido como variable, tal y como se observa en la Figura 21.



Figura 21. Canal de Transmisión de la Red 4G

Una vez enviada la señal desde el transmisor hasta el canal, estos datos son recibidos por una serie de bloques que componen el receptor del sistema 4G. El primer bloque es *OFDM Demodulator*, el cual permite realizar la demultiplexación de las portadoras recibidas en el canal de comunicación, mismas que deben guardar concordancia con la cantidad de subportadoras enviadas. Se realiza la demodulación mediante el bloque *64 QAM Demodulator*, el cual los símbolos ubicados en los puntos de constelación del modulador serán reubicados para su posterior codificación. Se realiza tanto la *Decodificación Convolutiva* y *Deinterleaver* en donde se reorganizan los símbolos recibidos y se hacen las operaciones necesarias para que se procesen los datos de manera inversa en la cual fueron transmitidos y se corrijan de manera correcta los errores que hayan podido suscitarse durante el proceso de transmisión. Finalmente, se ubica el *RS Decoder* el cual decodifica los símbolos Red Solomon para poder obtener los datos reales

que fueron transmitidos. En la Figura 22 se puede observar los bloques mencionados que forman parte del Receptor 4G.

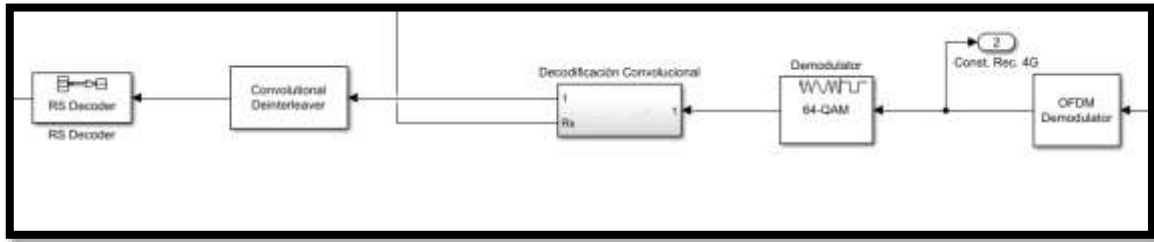


Figura 22. Bloques del Sistema de Recepción 4G

Para poder comprobar el correcto funcionamiento del sistema de comunicación, se procede a aplicar una simulación en donde, mediante el bloque *Constellation Diagram* el cual permite visualizar los 64 puntos de los símbolos generados durante la transmisión y recepción del sistema. En la Figura 23 (a) se puede observar la constelación generada por el sistema previo al ingreso de los símbolos al bloque del canal, en donde se identifican los 64 puntos de la modulación cuadrangular QAM. Por otro lado, en la Figura 23 (b) se puede observar la constelación de 64 QAM recibida después del canal AWGN, en donde se muestran unas ligeras dispersiones dentro de los puntos debido al ruido generado en el canal, lo que indica que la transmisión tiene una buena calidad, pero se tienen ligeras pérdidas o errores en la información.

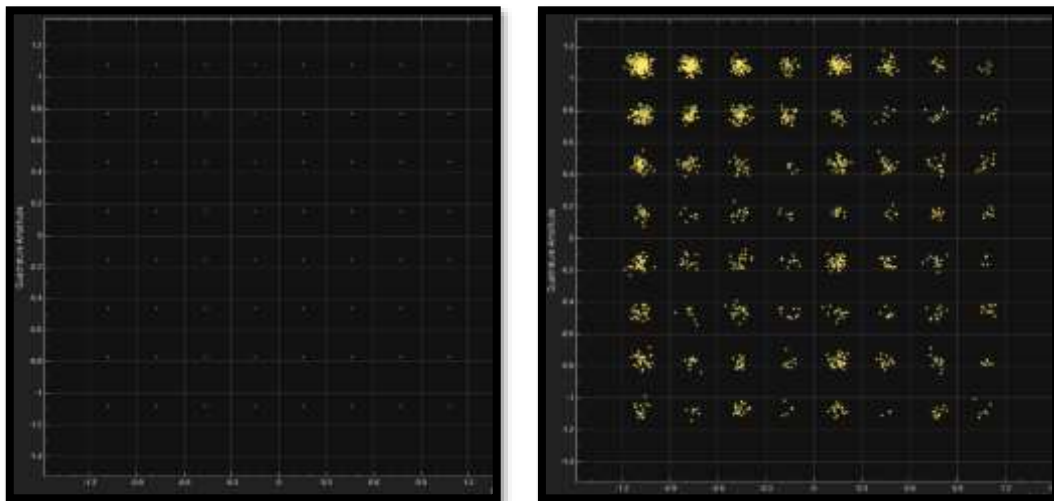


Figura 23. Diagrama de Constelación a) Señal Transmitida - b) Señal Recibida

Finalmente, se observa el espectro en frecuencia de la señal recibida, para confirmar el ancho de banda y la potencia de la señal. En la Figura 24 se puede observar la respuesta

obtenida en el dominio de la frecuencia de la señal recibida, en donde se tiene un ancho de banda de 100kHz y se identifica que la señal tiene una potencia de -33dB.

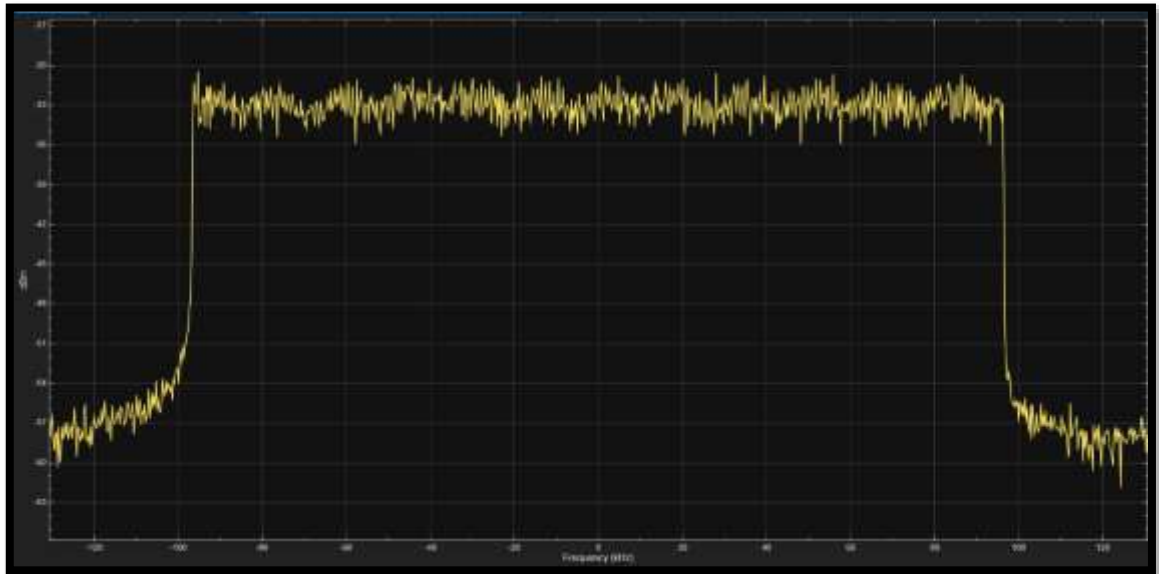


Figura 24. Espectro en Frecuencia de la Señal 4G Recibida

3.8.3 Parámetros de Medición de Calidad de Red

Una vez diseñados los sistemas tanto satelital como 4G, se procede a la implementación y medición de diferentes parámetros que permitan determinar la calidad de señal de cada uno de estos sistemas. En estudios como [39], se indica que los niveles de potencia recibida en una señal, la recepción de paquetes y latencia son indicadores clave para determinar la cobertura y calidad de una señal y se relacionan directamente con la distancia a la que se encuentra el dispositivo de red.

El primer parámetro seleccionado para comparar la calidad de red será la Latencia, la cual representa el retardo que se produce en la comunicación de una red. Se considera como el tiempo en el que un paquete se demora en llegar a otro punto del sistema de comunicación. Es importante considerar este parámetro para determinar la calidad del sistema debido a que en la mayoría de las aplicaciones móviles o industriales se busca generar una latencia baja para menor pérdida de información [40]. Para las redes analizadas 4G la latencia promedio se encuentra entre los 200 a 300 ms [41], mientras que las redes satelitales tienen entre 400 a 500 ms dependiendo de la órbita [42].

Para poder medir la variable de Latencia en cada uno de los escenarios de comunicación, se utiliza el bloque *Find Delay*, mismo que permite buscar el retardo entre dos señales, el cual entrega una señal de tiempo con la diferencia entre la señal recibida y la señal

transmitida [43]. El bloque correspondiente a la medición de latencia se lo puede observar en la Figura 25.

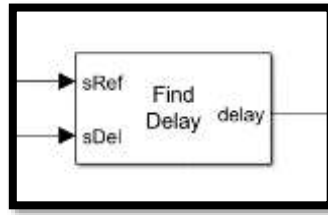


Figura 25. Bloque Find Delay para Medición de Latencia

El segundo parámetro que tomar en cuenta es el Bit Error Rate, el cual mide la integridad de las señales durante una comunicación, lo cual se basa en la cantidad o porcentaje del número de bits recibidos de manera incorrecta. En cuanto mayores sean los valores, es decir se acerquen a 1, la calidad de información recibida es mala; mientras que, si los valores se acercan a 0 o tienen número muy bajo, esta es una buena calidad de información recibida. En una señal que tiene una buena calidad los valores del BER se encuentran entre 10^{-9} a 10^{-13} [44].

Para la implementación y estimación dentro de los sistemas planteados, se utiliza el bloque *Error Rate Calculation*, el permite el cálculo de la tasa de error comparando los datos de entrada de una señal transmitida con los datos de una señal recibida [45]. En la Figura 26 se puede observar el bloque utilizado para la determinación del BER, para calcular los bits errados durante la comunicación.

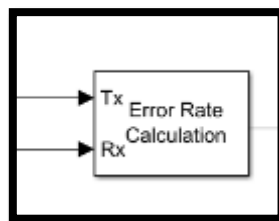


Figura 26. Bloque de Cálculo de BER para los Sistemas

El siguiente parámetro para tomarse en cuenta es el Nivel de Señal Recibida que en otros casos se conoce como Indicador de Potencia de Señal Recibida, el cual permite la medición de la potencia en el receptor tomando en cuenta el último paquete de información recibido y está relacionado directamente con la distancia a la que se encuentra el dispositivo receptor [46]. Los rangos aceptables para este tipo de parámetro

se encuentran entre -50 a 65 dBm para una calidad de señal excelente, mientras que mayor a 90dBm se puede indicar que la calidad de la señal es pobre [47].

Para el caso del nivel de señal, se utiliza el bloque denominado *Power Meter*, el cual permite la medición de la potencia de una señal de voltaje recibida, dentro de las cuales se obtiene como respuesta la potencia pico, promedio y la relación pico – promedio que es la que se utiliza para la determinación del nivel de señal recibida [48]. En la Figura 27 se puede observar el bloque correspondiente a la medición del parámetro de Nivel de Señal.

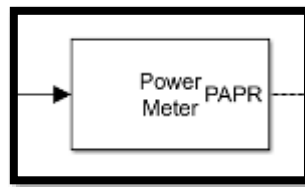


Figura 27. Bloque para Medición de Nivel de Señal de los Sistemas

Finalmente, el último parámetro definido es la Relación Señal a Ruido (SNR), el cual es un parámetro propio de los canales de comunicación que indica la relación entre la potencia de la señal transmitida y el ruido insertado dentro del canal. Este parámetro es fundamental para determinar la calidad de un sistema de comunicaciones y el rango óptimo de operación se encuentra entre 10 a 40, siendo el último el valor óptimo de este parámetro [49].

Para el caso actual de estudio, no se realiza directamente la medición del SNR, si no que se realiza una estimación de la distancia existente entre un dispositivo y cada una de las redes analizadas, para lo cual se estableció las distancias máximas de transmisión y su relación con el SNR, siendo la más cercana al punto de transmisión la que mejor SNR genera y de manera contraria para el caso óptimo. En la Figura 28 se puede observar la definición de los puntos de análisis para la transformación de distancia a SNR y la relación con el movimiento del dispositivo que se conectará a estas redes. Se debe tomar en cuenta que la distancia máxima que tiene cobertura un único nodo de transmisión 4G y una estación terrena satelital es de 12 Kilómetros [50], razón por la cual se determinó este análisis.

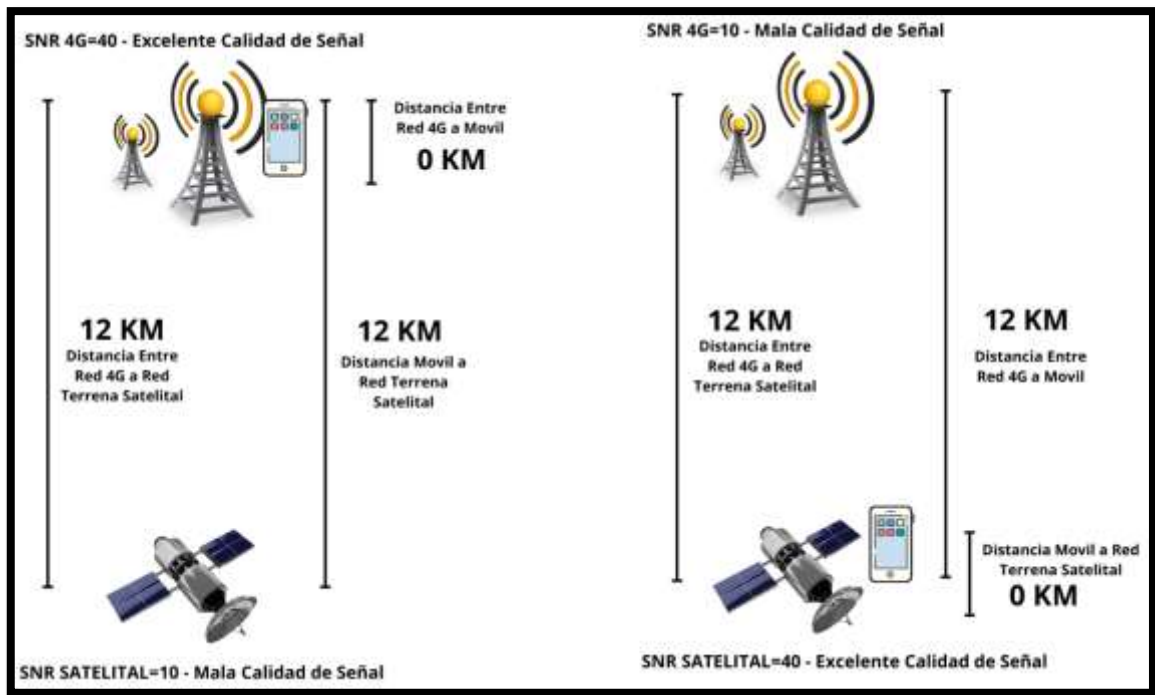


Figura 28. Relación entre Distancia y SNR

Con estos puntos se puede determinar la relación que permite transformar la distancia del dispositivo en dos distancias para cada sistema de comunicación y la SNR correspondiente a cada una de ellas. Se implementa un sistema que realiza esta conversión mediante un diagrama de bloques de Simulink tal y como se observa en la Figura 29.

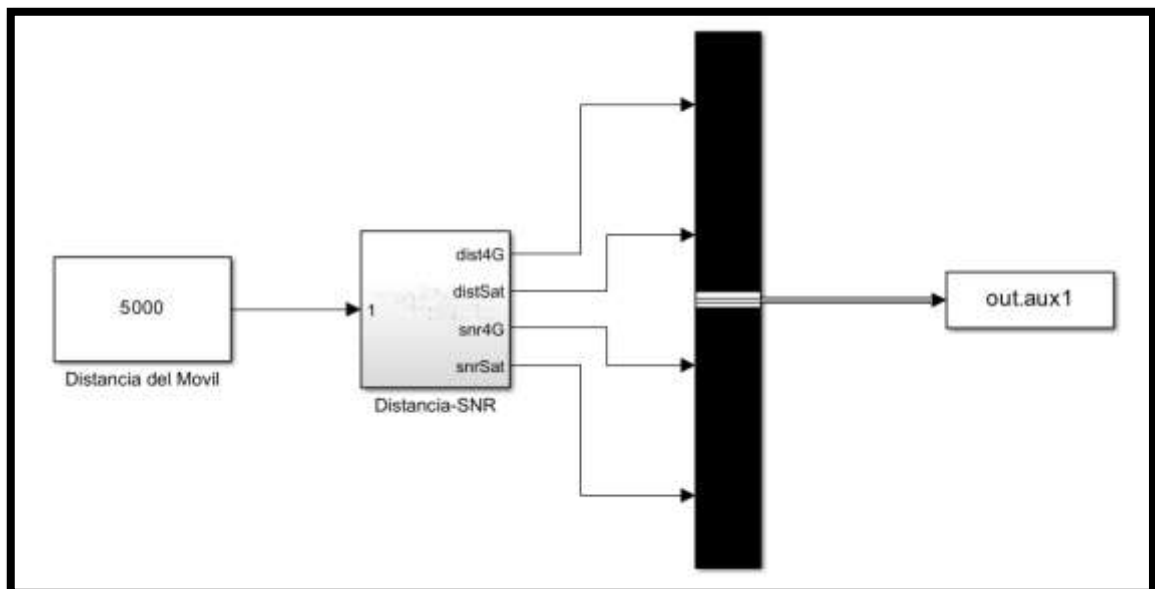


Figura 29. Diagrama de Bloques para Conversión de Distancia a SNR

Estos bloques permiten generar 4 variables como son Distancia 4G, Distancia Satelital, SNR4G y SNR SATELITAL, las que posteriormente permitirán generar los datos de calidad en ambas redes y de esta manera implementar la red neuronal correspondiente.

3.9 Red Neuronal

3.9.1 Generación de Base de Datos

Para efectuar correctamente un sistema basado en aprendizaje automático se requiere de una serie de datos etiquetados para poder tener un sistema supervisado, en el cual se tendrán datos de entrada y datos de salida que sirven como datos de entrenamiento para poder efectuar las predicciones de conexión.

En los datos de entrada se selecciona los parámetros de medición vistos anteriormente y de los cuales se generaron 10 entradas, de las cuales 5 son del sistema de comunicación satelital y 5 del sistema de comunicación 4G y de las cuales se puede observar en la Tabla 3 como se distribuyeron estos atributos, su identificador y el rango respectivo de variación.

Tabla 3. Atributos de Entrada del Sistema

| Atributo | Identificador | Rango |
|---------------------------------|----------------------|---------------------|
| Distancia 4G | DIST4G | 0 a 12000 Km |
| Distancia Satelital | DISTSAT | 0 a 12000 Km |
| BER 4G | BER4G | 1,50e-09 a 8,50e-03 |
| SNR 4G | SNR4G | 10.5 – 40 dB |
| Latencia 4G | LAT4G | 18 – 490 ms |
| Nivel de señal 4G | NS4G | -50,6 a -86 dB |
| BER Satelital | BERSAT | 1,50e-09 - 8,50e-03 |
| SNR Satelital | SNRSAT | 10.5 – 40 dB |
| Latencia Satelital | LATSAT | 18 – 490 ms |
| Nivel de Señal Satelital | NSSAT | -50,6 a -86 dB |

Con las entradas identificadas, se procede a dividir los niveles de calidad de señal para

asignarles un atributo que permita determinar que en qué nivel y a que red debería conectarse el dispositivo con esos datos de entrada. Para esto se generan 4 niveles de calidad, MALA, MEDIA, BUENA y ÓPTIMA, las cuales se dividen en los rangos que se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Rangos de Atributos de Entrada con Respecto a Calidad de Señal

| | MALA | MEDIA | BUENA | ÓPTIMA |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| DIST4G (m) | 9001 - 12000 | 6001 - 9000 | 3001 – 6000 | 0 - 3000 |
| DISTSAT (m) | 0 - 3000 | 3001 – 6000 | 6001 - 9000 | 9001 - 12000 |
| BER4G | 8,50E-03 | 8,50E-06 | 8,50E-08 | 8,50E-09 |
| | A | A | A | A |
| | 1,50E-03 | 1,50E-06 | 1,50E-08 | 1,50E-09 |
| SNR4G (dB) | 10 a 17.4 | 17.5 a 24.5 | 24.6 a 32 | 32.1 a 39.5 |
| LAT4G (ms) | 490 a 375 | 376 a 250 | 251 a 138 | 137 a 18 |
| NS4G (dB) | -86 a -77.6 | -77.5 a -68.5 | -68.4 a -59.7 | -59.6 a -50.1 |
| BERSAT | 8,50E-09 | 8,50E-08 | 8,50E-06 | 8,50E-03 |
| | a | a | a | a |
| | 1,50E-09 | 1,50E-08 | 1,50E-06 | 1,50E-03 |
| SNRSAT (dB) | 32.1 a 39.5 | 24.6 a 32 | 17.5 a 24.5 | 10 a 17.4 |
| LATSAT (ms) | 137 a 18 | 257 a 138 | 377 a 258 | 490 a 378 |
| NSSAT (dB) | -59.6 a -50.1 | -68.4 a -59.7 | -77.5 a -68.5 | -86 a -77.6 |

Divididos e identificados los rangos de calidad de señal, se agrega una variable que indique a que red se debe conectar el sistema, la cual obtiene dos valores, ENLACE 4G o ENLACE SATELITAL, lo que no da un total de 3 Salidas Clasificadas para el sistema.

En base a esta información cualitativa que entrega a cada una de las entradas a las salidas del conjunto de datos, se requiere asignar una variable numérica para poder procesar esta información dentro del algoritmo de clasificación, para lo cual, tal y como se observa en la Tabla 5 se han asignado los valores numéricos que se visualizan para Calidad de Señal de 0 a 3 y de Conexión 0 y 1.

Tabla 5. Asignación de Variables Numéricas a Variables Cualitativas

| Atributo de Salida | Identificador | MALA | MEDIA | BUENA | ÓPTIMA |
|----------------------------|---------------|------|-------|-------|--------|
| Calidad de Señal 4G | CALIDAD4G | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Calidad de Señal Satelital | CALIDADSAT | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Conexión | ENLACE | 0 | 0 | 1 | 1 |

Identificadas las entradas y salidas del sistema, se procede a generar la base de datos para el entrenamiento, para esto se deben realizar diversas pruebas para poder obtener toda la información que requiere la red neuronal para poder ejecutar la clasificación de manera correcta. Se escoge una cantidad de 3000 pruebas que generarán 3000 instancias de datos, mismas que son ingresadas en el sistema que se observa en la Figura 30 y que permite el cálculo de todas las variables tanto de entradas como salidas de los enlaces satelital y 4G.

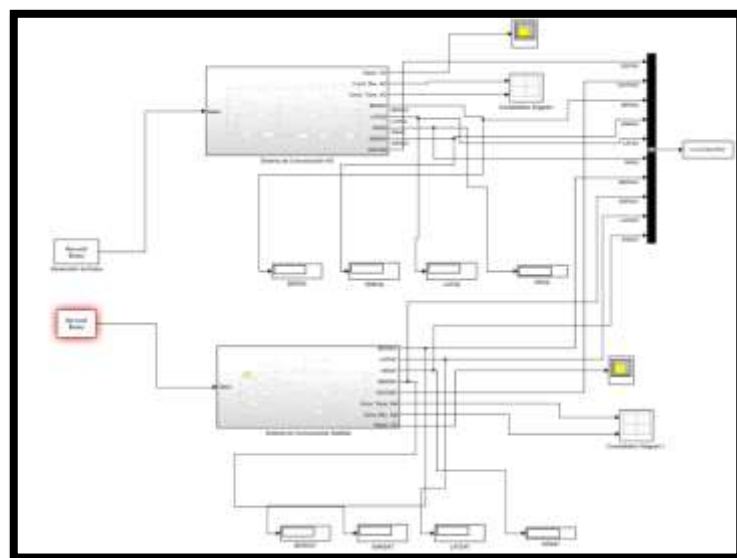


Figura 30. Sistema para Extraer Datos de Entrenamiento

Para poder generar una base de datos confiable se dividen las 3000 pruebas en rangos de 200 metros para poder abarcar todo el movimiento posible del dispositivo para lo cual se realizan 50 pruebas aleatorias dentro del rango establecido y se generan 60 pruebas para cada distancia tal y como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Intervalos de Pruebas para Generación de Datos de Entrenamiento

| Intervalos | Rangos de Distancia (m) | Pruebas |
|-------------------|------------------------------------|----------------|
| Rango 1 | 0 -200 | 50 |
| Rango 2 | 201 - 400 | 50 |
| Rango 3 | 401 - 600 | 50 |
| | | |
| Rango 58 | 11400 - 11600 | 50 |
| Rango 59 | 11601 - 11800 | 50 |
| Rango 60 | 11801 - 12000 | 50 |
| Total | | 3000 |

Con los rangos establecidos se efectúan todas las pruebas mencionadas para generar la base de datos de entrenamiento y se los almaceno en una variable denominada *Totales*, en donde las columnas de la 1 a la 10 representan las entradas del sistema o datos para la estimación de la calidad de señal y las columnas 11, 12 y 13 corresponden a las salidas asignadas como los valores numéricos que indican a que red se conecta y que calidad de señal tiene cada sistema, en la Figura 31 se pueden observar los datos generados por las pruebas de entrenamiento.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----------|------------|------------|---------|---------|----------|--------|---------|----------|----------|----|----|----|
| 91.3093 | 1.1909e+04 | 1.6409e-09 | 10.5766 | 17.0190 | -50.5824 | 0.0084 | 39.0507 | 486.3276 | -85.4333 | 3 | 0 | 1 |
| 139.9506 | 1.1860e+04 | 1.6743e-09 | 10.7244 | 17.3181 | -50.0215 | 0.0083 | 39.3097 | 486.7960 | -85.8031 | 3 | 0 | 1 |
| 129.0570 | 1.1871e+04 | 1.9190e-09 | 10.8260 | 15.6941 | -50.3766 | 0.0083 | 39.4790 | 482.7538 | -85.6343 | 3 | 0 | 1 |
| 138.2928 | 1.1862e+04 | 1.5875e-09 | 10.5446 | 15.5351 | -50.5292 | 0.0084 | 39.2231 | 482.3796 | -85.8081 | 3 | 0 | 1 |
| 172.0313 | 1.1828e+04 | 1.9259e-09 | 10.8865 | 14.7203 | -50.2719 | 0.0080 | 39.0751 | 488.9709 | -85.9534 | 3 | 0 | 1 |
| 186.9176 | 1.1813e+04 | 1.5589e-09 | 10.8211 | 10.4858 | -50.1552 | 0.0082 | 39.0465 | 489.5329 | -85.6077 | 3 | 0 | 1 |
| 175.8738 | 1.1824e+04 | 1.6026e-09 | 10.5003 | 13.7747 | -50.2847 | 0.0081 | 39.4466 | 485.6122 | -85.8857 | 3 | 0 | 1 |
| 147.5597 | 1.1852e+04 | 1.5736e-09 | 10.9412 | 13.3886 | -50.2474 | 0.0081 | 39.1359 | 482.8325 | -85.5813 | 3 | 0 | 1 |
| 186.2849 | 1.1814e+04 | 1.5674e-09 | 10.5104 | 16.2284 | -50.2183 | 0.0081 | 39.2372 | 482.0367 | -85.8648 | 3 | 0 | 1 |
| 152.3976 | 1.1848e+04 | 1.8576e-09 | 10.5466 | 16.9946 | -50.1047 | 0.0084 | 39.4352 | 486.6107 | -85.4396 | 3 | 0 | 1 |
| 1.8398 | 1.1998e+04 | 1.7505e-09 | 10.7257 | 14.2585 | -50.5890 | 0.0084 | 39.1629 | 485.1552 | -85.5905 | 3 | 0 | 1 |
| 64.3318 | 1.1936e+04 | 1.5161e-09 | 10.8198 | 15.3703 | -50.5249 | 0.0084 | 39.0945 | 489.4753 | -85.7739 | 3 | 0 | 1 |
| 109.6419 | 1.1890e+04 | 1.7806e-09 | 10.8908 | 17.7451 | -50.3439 | 0.0084 | 39.3312 | 487.4781 | -85.4968 | 3 | 0 | 1 |
| 146.8521 | 1.1853e+04 | 1.5046e-09 | 10.9542 | 15.7037 | -50.3559 | 0.0083 | 39.2074 | 489.0031 | -85.4065 | 3 | 0 | 1 |
| 85.5430 | 1.1914e+04 | 1.6726e-09 | 10.6822 | 12.9593 | -50.4502 | 0.0083 | 39.2973 | 487.4204 | -85.8445 | 3 | 0 | 1 |
| 74.8184 | 1.1925e+04 | 1.8504e-09 | 10.8032 | 14.2068 | -50.5363 | 0.0083 | 39.4840 | 488.6050 | -85.4798 | 3 | 0 | 1 |
| 49.5342 | 1.1950e+04 | 1.5836e-09 | 10.9900 | 11.8821 | -50.0749 | 0.0084 | 39.4336 | 485.8414 | -85.5776 | 3 | 0 | 1 |
| 194.7499 | 1.1885e+04 | 1.6039e-09 | 10.7334 | 14.8415 | -50.5293 | 0.0080 | 39.3986 | 489.6738 | -85.8003 | 3 | 0 | 1 |
| 101.4014 | 1.1899e+04 | 1.6395e-09 | 10.8515 | 15.5955 | -50.4904 | 0.0081 | 39.1550 | 488.8750 | -85.6072 | 3 | 0 | 1 |
| 68.8812 | 1.1931e+04 | 1.5639e-09 | 10.5262 | 13.1409 | -50.2242 | 0.0083 | 39.3450 | 484.0256 | -85.9044 | 3 | 0 | 1 |
| 9.3426 | 1.1991e+04 | 1.8855e-09 | 10.6491 | 16.4694 | -50.2012 | 0.0084 | 39.1171 | 488.6469 | -85.5600 | 3 | 0 | 1 |
| 115.2971 | 1.1885e+04 | 1.8442e-09 | 10.9207 | 16.1635 | -50.3464 | 0.0082 | 39.4811 | 484.1340 | -85.5669 | 3 | 0 | 1 |
| 51.4355 | 1.1949e+04 | 1.9553e-09 | 10.5298 | 10.6633 | -50.2582 | 0.0082 | 39.2993 | 486.0176 | -85.9610 | 3 | 0 | 1 |
| 114.2451 | 1.1886e+04 | 1.9261e-09 | 10.9598 | 16.7589 | -50.5438 | 0.0082 | 39.2158 | 485.9810 | -85.6908 | 3 | 0 | 1 |

Figura 31. Variable de Matlab con los Datos de Entradas y Salidas de Entrenamiento para Red Neuronal

3.9.2 Diseño de Red Neuronal

Con los datos de entrenamiento obtenidos, se requiere el diseño de la red neuronal para que el Sistema de Vertical Hand Over pueda identificar de manera correcta a que red debe conectarse dependiendo de la distancia a la que se encuentra el dispositivo con respecto a las redes de conexión. Para esto se utiliza la herramienta de Matlab *Neural Net Fitting*, misma que permite crear, visualizar y entrenar una red de dos capas para resolver problemas de clasificación tal y como se observa en la Figura 32.

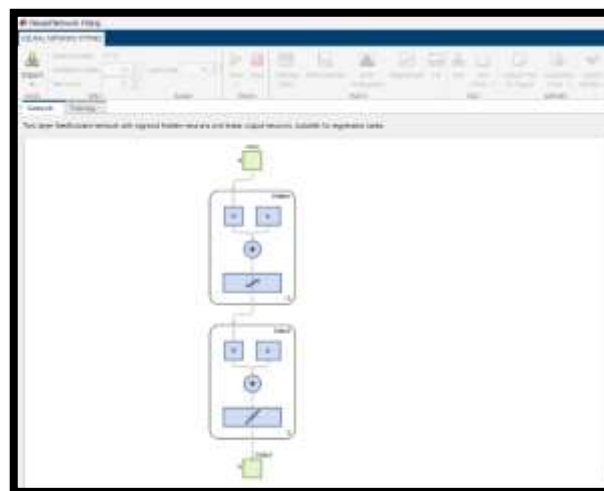


Figura 32. Pantalla Principal de Herramienta Neural Net Fitting

Una vez dentro de la pantalla de la herramienta, se debe importar los datos de entrenamiento, para esto se da clic en *IMPORT* y se seleccionan las variables de datos de entrenamiento de entrada y salida, tal y como se observa en la Figura 33 en donde se muestran que existen 3000 instancias de entrada con 10 atributos y 3000 instancias de salida con 3 atributos.

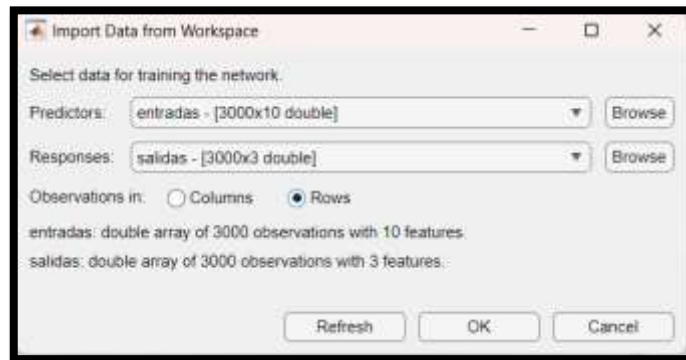


Figura 33. Importación de Datos de Entrenamiento

Con los datos de entrenamiento importados, se requiere identificar el número de neuronas que tendrá la capa intermedia, para lo cual se escoge una cantidad de 5 neuronas, por lo que el sistema tendrá 10 neuronas de entrada, 5 en la capa intermedia y 3 en la capa de salida tal y como se observa en la Figura 34.

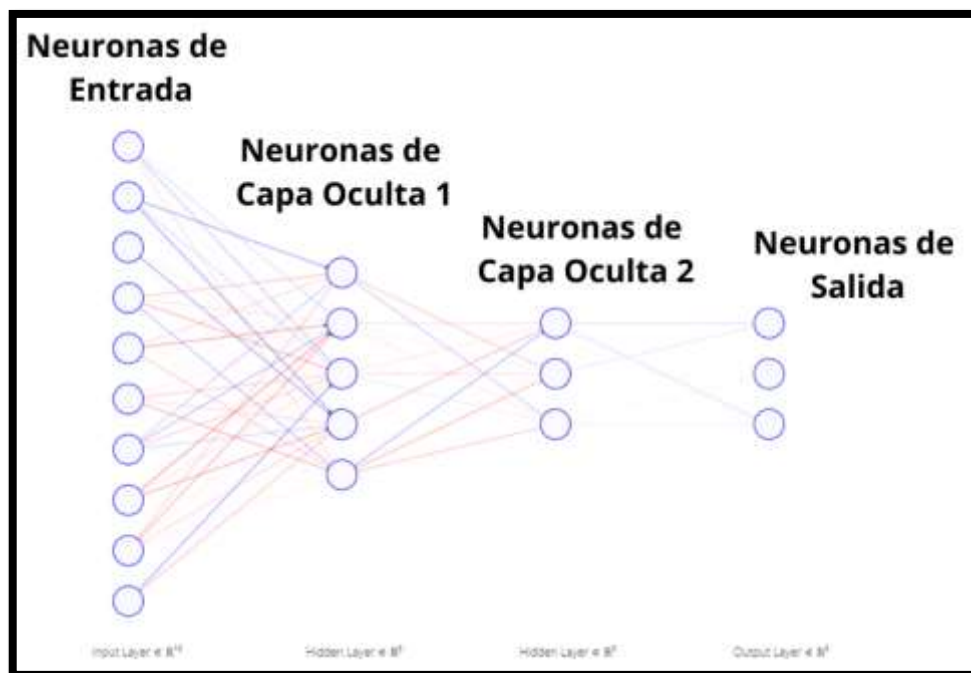


Figura 34. Estructura de la Red Neuronal Diseñada

Definida la estructura de la red neuronal, se procede a seleccionar que porcentaje del total de los datos se utilizará para el Entrenamiento, Validación y Pruebas. Para esto, se asigna un 70% para el entrenamiento de la red lo que corresponde a 2100 instancias, un 15% de los datos será destinado a la validación que corresponde a 450 y finalmente un 15% serán para testear la red neuronal que corresponde a 450 muestras. Posteriormente se requiere la selección del tipo de función de entrenamiento con la que será implementada la red neuronal, para este caso se selecciona la *Función Retropropagación de Gradiente Conjugado* que se observa en la Figura 35, la cual actualiza los valores de peso y sesgo con el método de gradiente conjugado escalado.

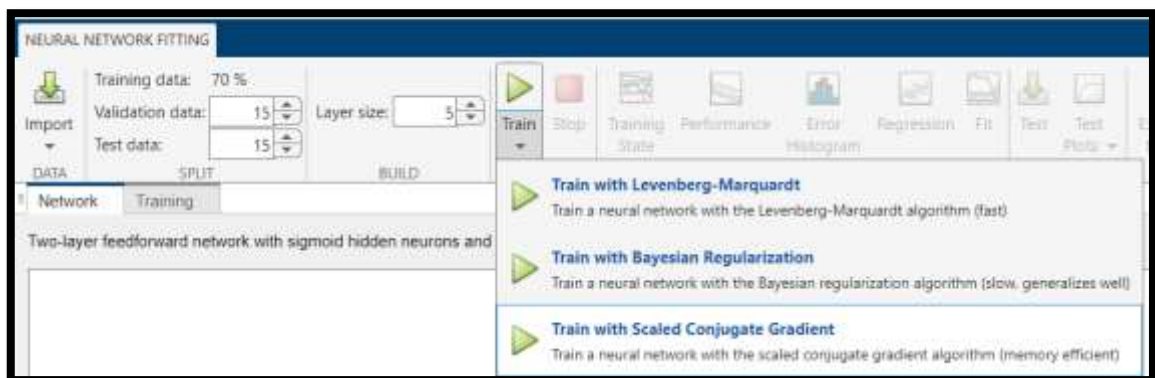


Figura 35. Selección de Cantidad de Datos de Validación y Función de Entrenamiento

Con esto se procede al entrenamiento de la Red Neuronal diseñada, para lo cual la herramienta procede a la asignación aleatoria de pesos y sesgos dependiendo de la función escogida y en cada *Época* se ajustan hasta llegar a un punto máximo de rendimiento. En la Figura 36 se puede observar el proceso de entrenamiento en donde se detiene a las 146 épocas con un rendimiento de 0.0118 en un tiempo aproximado de 1 segundo.

| Training Progress | | |
|-------------------|---------------|---------------|
| Unit | Initial Value | Stopped Value |
| Epoch | 0 | 146 |
| Elapsed Time | - | 00:00:01 |
| Performance | 2.22 | 0.0118 |
| Gradient | 3.97 | 0.0174 |
| Validation Checks | 0 | 6 |

Figura 36. Respuesta del Proceso de Entrenamiento

Finalmente, se observan los resultados obtenidos en cuanto al Error Cuadrático Medio (MSE) el cual debe ser lo más cercano a 0, y a la Regresión (R) que debe acercarse a 1 para indicar que la red neuronal clasifica de manera correcta. En la Figura 37 se muestran los resultados de la red neuronal diseñada en donde indica un MSE=0.0127 (Figura 38) y R=0.994 (Figura 39) con respecto a los datos de prueba. Con respecto al MSE, la gráfica muestra en color azul el valor esta variable con respecto a los datos de entrenamiento, en color verde a los datos seleccionados para la validación y en color rojo los datos de prueba; de igual manera para la regresión se asignan los mismos colores para identificar el comportamiento en cada época. Se observa en la Figura 38 y Figura 39 se observa que existe una relación entre la MSE y R, en donde el valor más pequeño de MSE que corresponde a los datos de validación tiene un valor más alto en cuanto a regresión.

| | Observations | MSE | R |
|------------|--------------|--------|--------|
| Training | 2100 | 0.0120 | 0.9947 |
| Validation | 450 | 0.0107 | 0.9953 |
| Test | 450 | 0.0127 | 0.9944 |

Figura 37. Resultados de MSE y R para Red Neuronal Diseñada

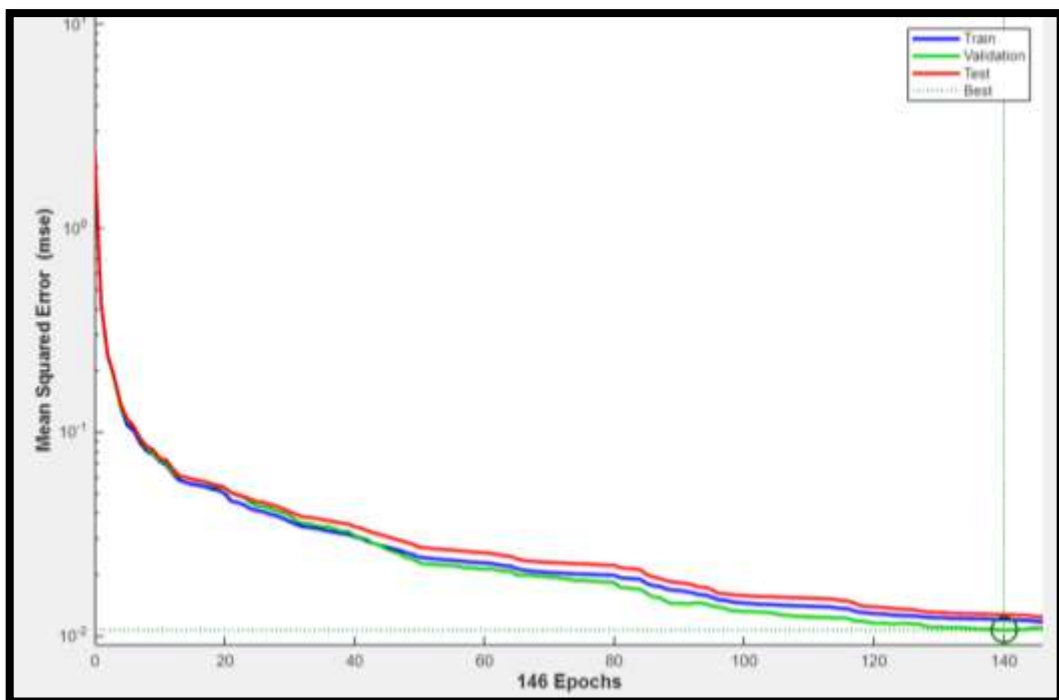


Figura 38. Gráfica de MSE durante el proceso de Entrenamiento Red Diseñada

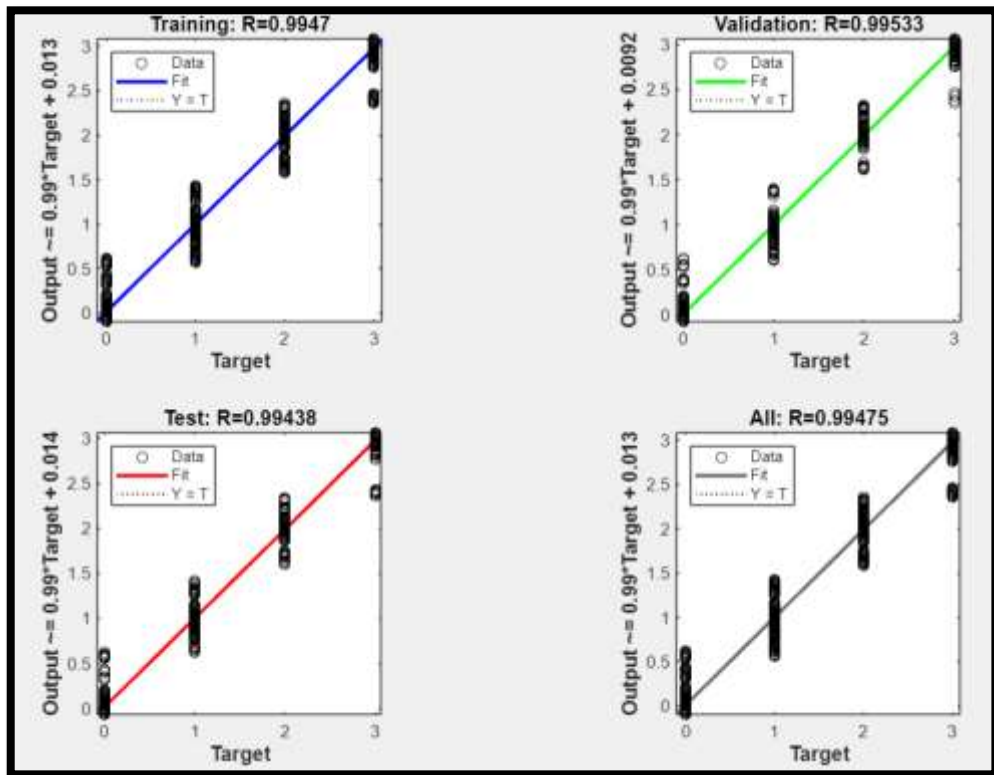


Figura 39. Gráficas de Regresión de la Red Neuronal Diseñada

3.9.3 Optimización del Sistema Predictivo

Una vez obtenidos los resultados de la red neuronal diseñada, se observa que la regresión tiene un valor alto de 0.99475, sin embargo, para este tipo de clasificadores que tienen únicamente 3 salidas, se requiere una respuesta del 1 o 100% en la cantidad de clasificaciones correctas por lo que se optará en la optimización, cambiando la estructura de la red, así como la función de entrenamiento.

Como primer punto se modifica la cantidad de neuronas dentro de la primera capa intermedia, a 10, por lo que la estructura de la nueva red corresponde al diagrama que se observa en la Figura 40, con 10 neuronas de entrada, 10 neuronas en la capa intermedia 1, 3 neuronas en la capa intermedia 2 y 3 neuronas de salida.

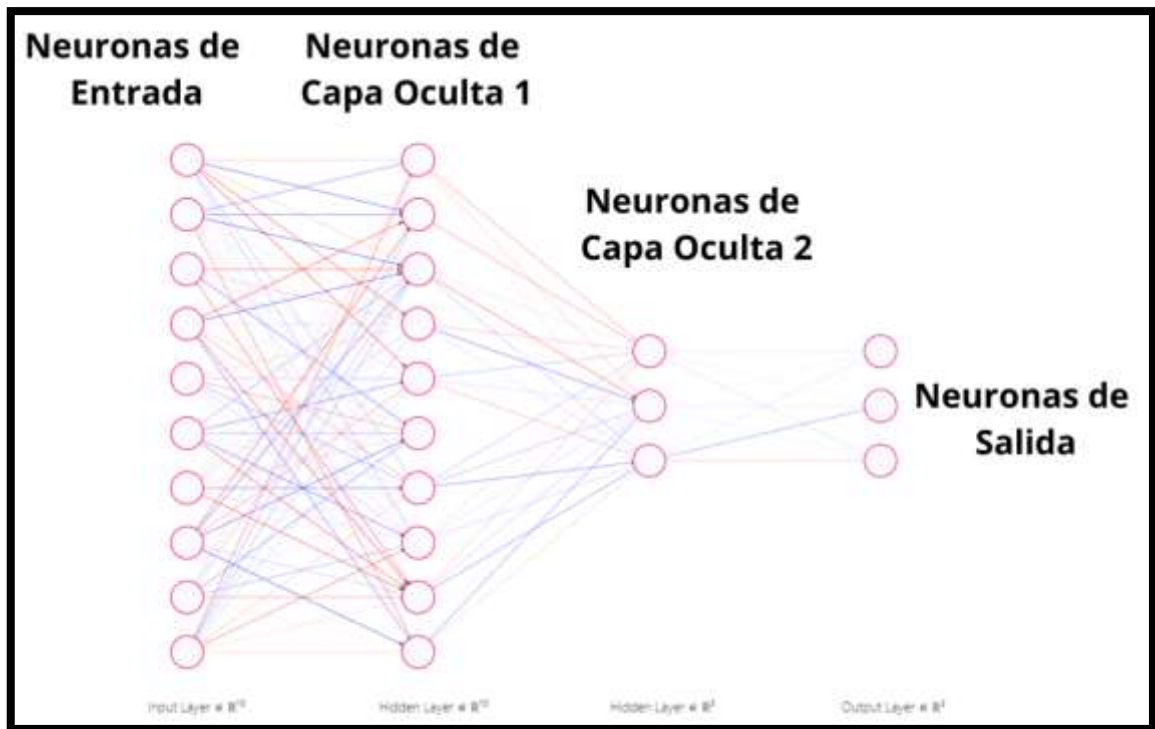


Figura 40. Estructura de la Red Neuronal Optimizada

Posteriormente, se selecciona el porcentaje de datos que serán utilizados como entrenamiento, validación y pruebas, escogiendo los mismos valores que en el caso anterior para poder comparar de la manera más precisa la respuesta obtenida. En cuanto a la función de activación, se selecciona la *Regularización Bayesiana*, tal y como se observa en la Figura 41, la cual los valores de peso y sesgo de acuerdo con la optimización de Levenberg-Marquardt, para posteriormente minimizar la combinación de errores cuadráticos y pesos, y de esta forma seleccionar la combinación más adecuada que genere una red de clasificación precisa.

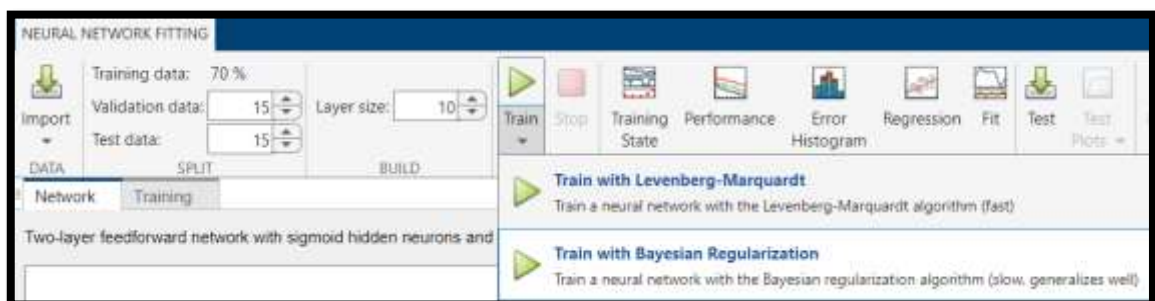


Figura 41. Parámetros de Entrenamiento de Red Neuronal Optimizada

En cuanto a la respuesta de entrenamiento obtenido, se observa un aumento en la cantidad de épocas para llegar al punto óptimo de clasificación con 549 en un tiempo de 19

segundos. En la Figura 42 se pueden observar los valores del entrenamiento obtenidos de la red neuronal optimizada, con un rendimiento de $1.5e-9$.

| Training Progress | | |
|-------------------|---------------|---------------|
| Unit | Initial Value | Stopped Value |
| Epoch | 0 | 549 |
| Elapsed Time | - | 00:00:19 |
| Performance | 11.3 | $1.5e-09$ |
| Gradient | 13.3 | $9.86e-08$ |
| Mu | 0.001 | $1e-10$ |
| Validation Checks | 0 | 0 |

Figura 42. Respuesta de Entrenamiento de Red Neuronal Optimizada

Finalmente, se observa en la Figura 43 los resultados de las pruebas de la red neuronal en base al 15% del total de los datos, en donde se obtiene un $MSE=1.3529e-6$ con un $R=1.000$, lo que indica que esta variación en la estructura de la red tiene mejor calidad que la de 5 neuronas en la capa intermedia 1, las gráficas de resultados de MSE y R se pueden observar en la Figura 44 y la Figura 45. En cuanto a los datos de entrenamiento (Color Azul) se tiene una $R=1$ con respecto al MSE de $1.5e-9$ siendo el mejor valor de estas variables, mientras que en los datos de prueba (Color Rojo), se obtiene un valor de $1.35e-6$ con un $R=1$; y en los datos de validación (Color Verde) $R=1$ con $MSE=9.63E-9$ valor cercano a lo obtenido en los datos de entrenamiento durante la época 549.

| | Observations | MSE | R |
|-------------------|--------------|--------------|--------|
| Training | 2100 | $1.5036e-09$ | 1.0000 |
| Validation | 450 | $9.6338e-09$ | 1.0000 |
| Test | 450 | $1.3529e-06$ | 1.0000 |

Figura 43. Resultados de Entrenamiento de Red Neuronal Optimizada

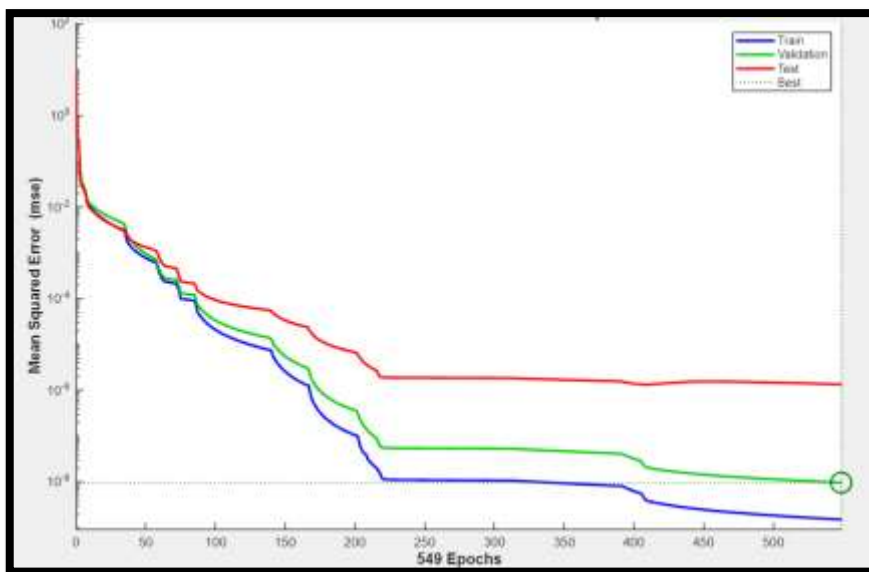


Figura 44. Respuesta de MSE de Red Neuronal Optimizada

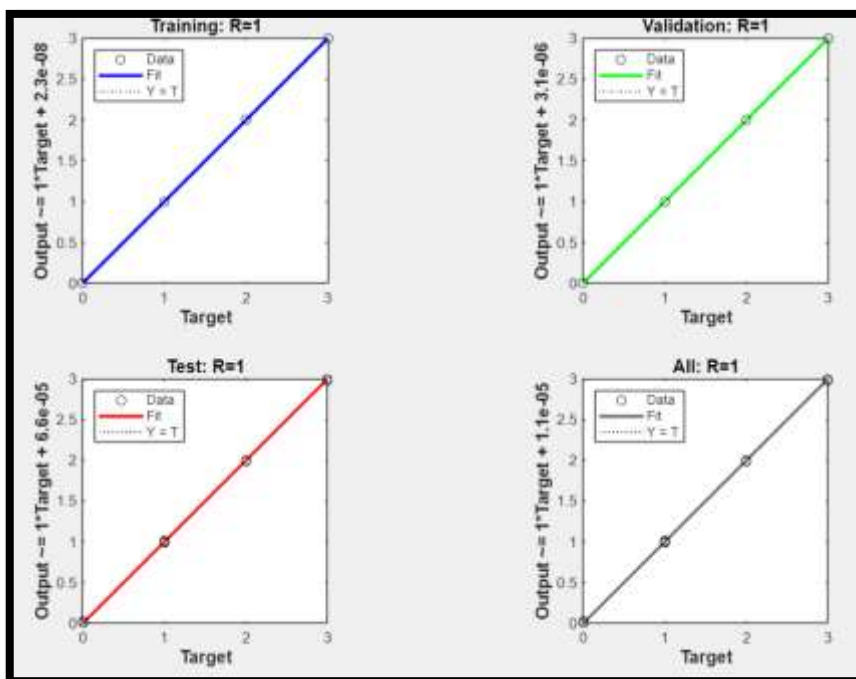


Figura 45. Respuesta de Regresión en Red Neuronal Optimizada

3.9.4 Generación de Sistema de Predicción

Una vez obtenida la red neuronal con el mejor rendimiento, se procede a la exportación de esta en base al entrenamiento realizado y con la estructura diseñada. Para esto, mediante la herramienta de *Neural Network Fitting* se exporta el modelo de red hacia el espacio de trabajo y se almacenan los datos dentro de una variable denominada *modeloentrenado.mat*.

En la Figura 46 se puede observar el diagrama de flujo para la predicción del sistema, en donde, en primer lugar, se procede a ingresar el valor de distancia del dispositivo móvil, se ejecuta el modelo *Calculo Distancia* para poder estimar en valor de SNR que tendrá la señal. Posteriormente se ejecuta el modelo *modeloVerticalHandOver*, el cual calcula las 10 entradas correspondientes a los parámetros de estimación de calidad de señal, almacenándolos en una variable del WorkSpace denominada *out.entradasRed*. Para realizar la predicción, se ejecuta el archivo *redneuronai.mlx*, en donde se carga el modelo entrenado, y se procede a la utilización de la instrucción *clasificacion=int32(red(out.entradasRed))*; la cual ingresa los datos que contiene la variable *out.entradasRed* y los ejecuta dentro de la red neuronal planteada en donde se obtienen como resultados un vector con 3 valores que corresponde a las salidas Calidad4G, CalidadSat y Enlace. Finalmente, el algoritmo verifica que valor contiene cada una de estas variables para asignar el valor cualitativo correspondiente MALA, ÓPTIMA, etc.; y a cuál red se debe conectar el dispositivo ya sea Enlace Satelital o Enlace 4G para de esta manera conseguir el Vertical Hand Over entre las redes analizadas.

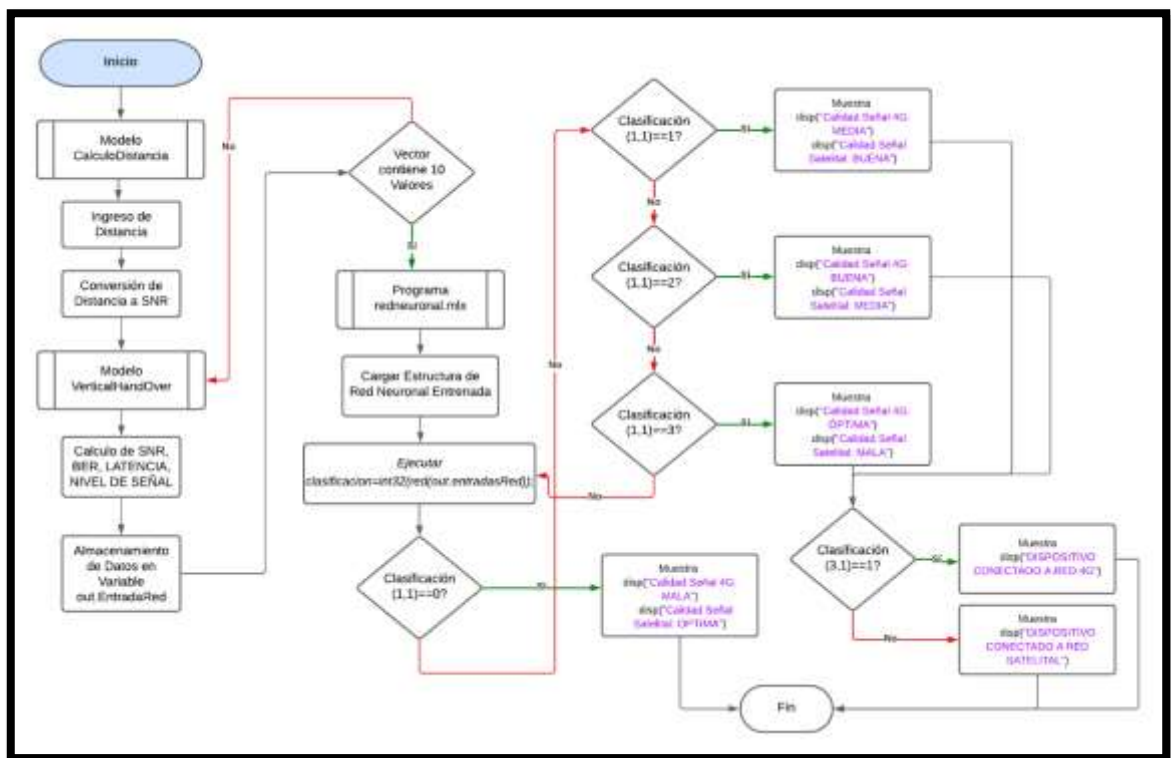


Figura 46. Diagrama de Flujo del Sistema de Vertical Hand Over

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados Red 4G

Para analizar los resultados de la estimación de Parámetros de la Red 4G, se procede a ejecutar 4 pruebas en los diferentes rangos de Calidad de Señal, en donde se selecciona de manera aleatoria el valor de distancia correspondiente. Con esto se ejecuta el sistema para observar el comportamiento de las señales de calidad que se encuentra calculando el modelo. En la Tabla 7 se puede observar los resultados de las 4 pruebas realizadas.

Tabla 7. Resultados de Estimación de Parámetros en Red 4G

| Resultados Red 4G | | | | | |
|--------------------------|------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Prueba | Distancia | BER | SNR | LAT | NS |
| | (m) | | (dB) | (ms) | (dB) |
| MALA | 9247 | 0,001322 | 16,88 | 379,9 | -77,74 |
| BUENA | 7949 | 0,0002048 | 20,13 | 328 | -73,85 |
| MEDIA | 5592 | 5,47E-06 | 26,02 | 233,7 | -66,78 |
| ÓPTIMA | 927 | 4,03E-09 | 37,68 | 47,08 | -52,78 |

En la Figura 47 se puede observar la respuesta del BER obtenido en cada uno de los diferentes rangos de medición asignados para las pruebas, en donde se identifica que existe un aumento exponencial de este valor en cuanto aumenta la distancia y la calidad disminuye.

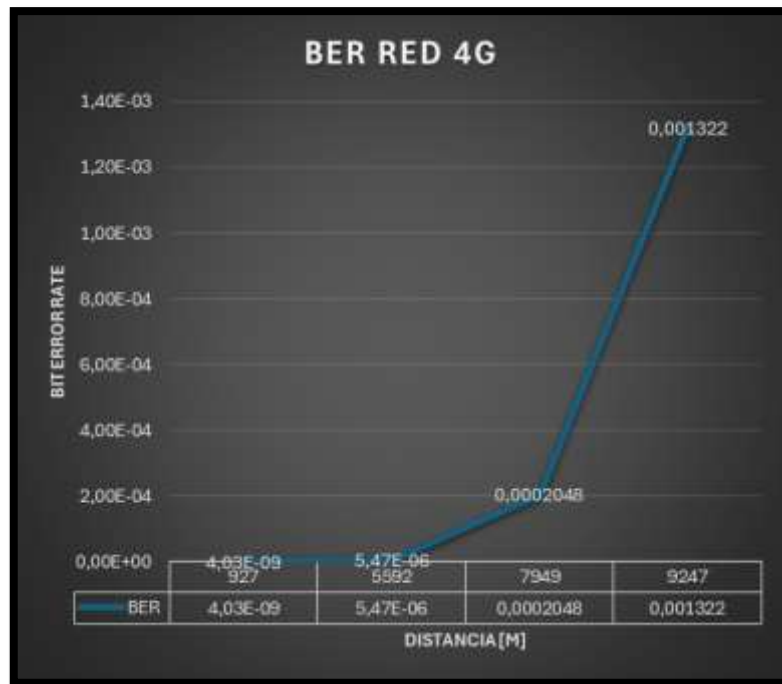


Figura 47. Resultado de BER en RED 4G en Cada Segmento

Por otro lado, se observa que en cuanto al SNR en estas pruebas se tiene un valor decreciente desde los 37.68dB para calidad de señal óptima, hacia los 16.88dB en el segmento de calidad de señal mala tal y como se aprecia en la Figura 48.

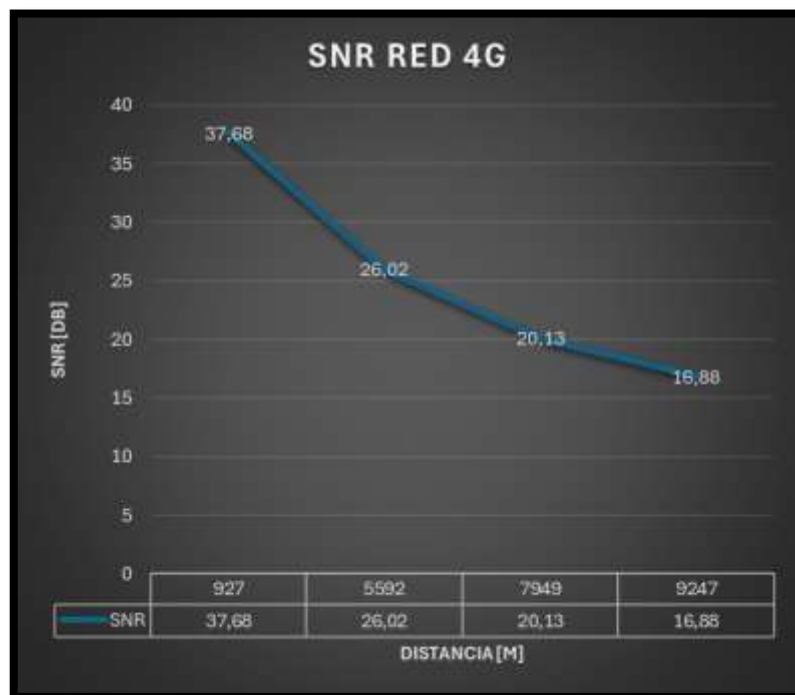


Figura 48. Resultado de SNR en RED 4G en Cada Segmento

De igual forma que en la respuesta de BER, la respuesta de latencia que se observa en la Figura 49 tiene una tendencia a incrementar mientras la distancia aumenta, desde los 47.08 ms a 927 metros a 379.9 ms en 9247 metros.



Figura 49. Resultado de Latencia en RED 4G en Cada Segmento

Finalmente, con respecto a los resultados de nivel de señal, tal como se muestra en la Figura 50 se tiene una tendencia decreciente del valor de esta variable, la cual va desde -52.78 en un nivel óptimo de señal hasta los -77.74 para un nivel malo en este tipo de redes.

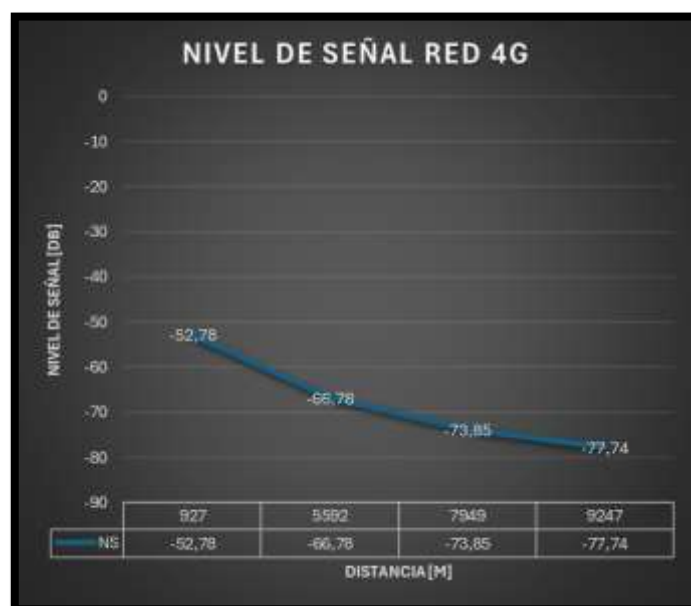


Figura 50. Resultado de Nivel de Señal en RED 4G en Cada Segmento

4.1.1 Resultados Red Satelital

De la misma manera que se realiza el análisis de resultados en la estimación de Parámetros de la Red 4G, se procede a ejecutar 4 pruebas en los diferentes rangos de Calidad de Señal, pero considerando el sistema Satelital, colocando la distancia de prueba. En la Tabla 8 se puede observar los resultados obtenidos en las pruebas de red satelital.

Tabla 8. Resultados de Estimación de Parámetros en Red Satelital

| Resultados Red Satelital | | | | | |
|---------------------------------|------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Prueba | Distancia | BER | SNR | LAT | NS |
| | (m) | | (dB) | (ms) | (dB) |
| MALA | 1749 | 0,004647 | 14,37 | 420 | -80,75 |
| BUENA | 3351 | 0,0007649 | 18,38 | 356 | -75,95 |
| MEDIA | 7543 | 1,25E-06 | 28,86 | 188,3 | -63,37 |
| ÓPTIMA | 10582 | 1,12E-08 | 36,45 | 66,72 | -54,25 |

En la Figura 51 se puede observar la respuesta del BER obtenido en cada uno de los diferentes rangos de medición asignados para las pruebas de red satelital, en donde se identifica que, al contrario que las redes 4G, existe una disminución exponencial de este valor en cuanto aumenta la distancia y la calidad mejora.

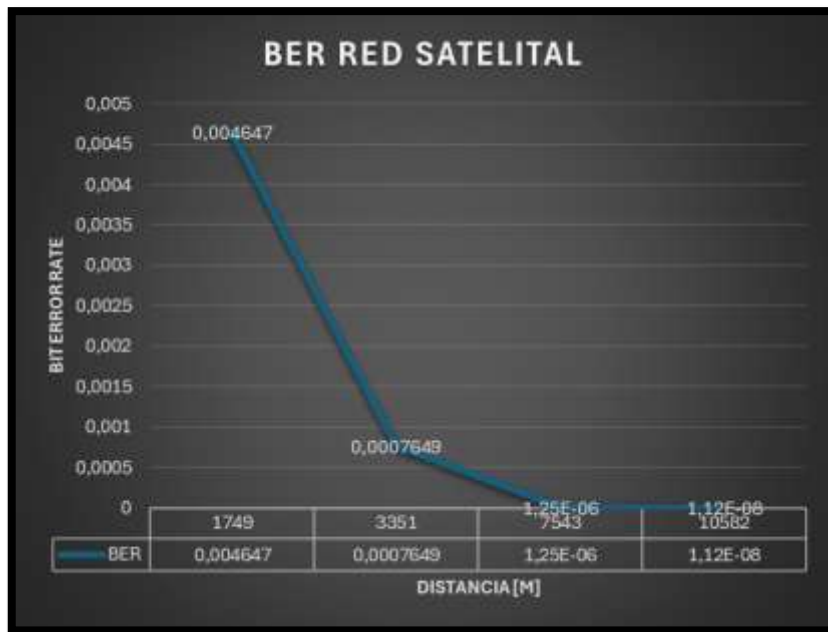


Figura 51. Resultado de BER en RED Satelital para Cada Segmento

Por otro lado, se observa que en cuanto al SNR en estas pruebas se tiene un valor creciente desde los 14.37 dB para calidad de señal mala, hacia los 36.45 dB en el segmento de calidad de señal óptima tal y como se aprecia en la Figura 52.

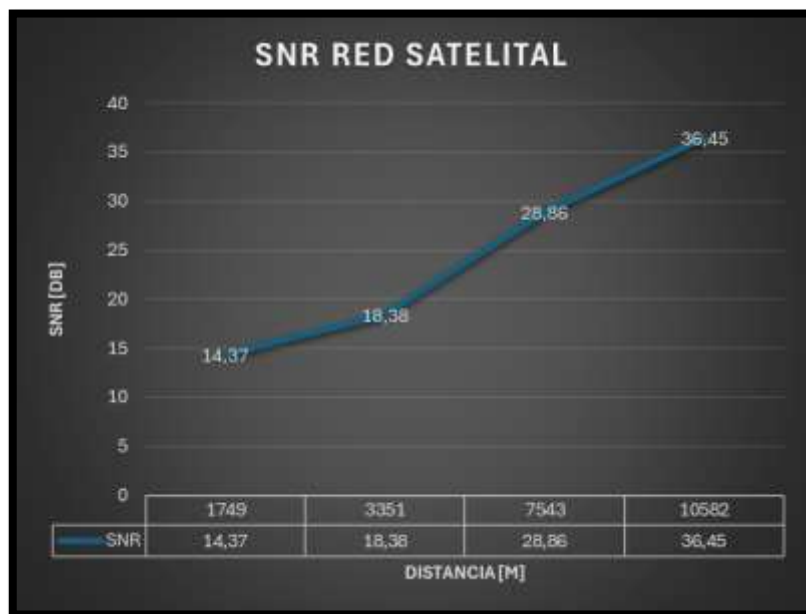


Figura 52. Resultado de SNR en RED Satelital para Cada Segmento

De igual forma que en la respuesta de BER, la respuesta de latencia que se observa en la Figura 53 tiene una tendencia al descenso siempre que la distancia aumenta, desde los 420 ms a 1749 metros a 66.72 ms a una distancia de 10582 metros.

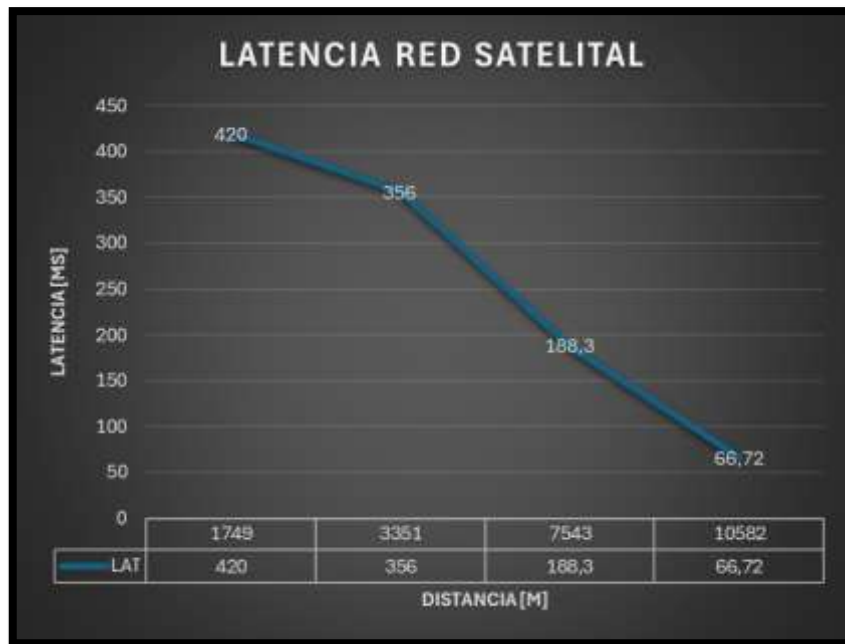


Figura 53. Resultado de Latencia en RED Satelital para Cada Segmento

Finalmente, con respecto a los resultados de nivel de señal, tal como se muestra en la Figura 54 se tiene una tendencia a aumentar el valor de esta variable, la cual va desde -80.75 en un nivel malo de señal hasta los -54.25 para un nivel óptimo en este tipo de redes.

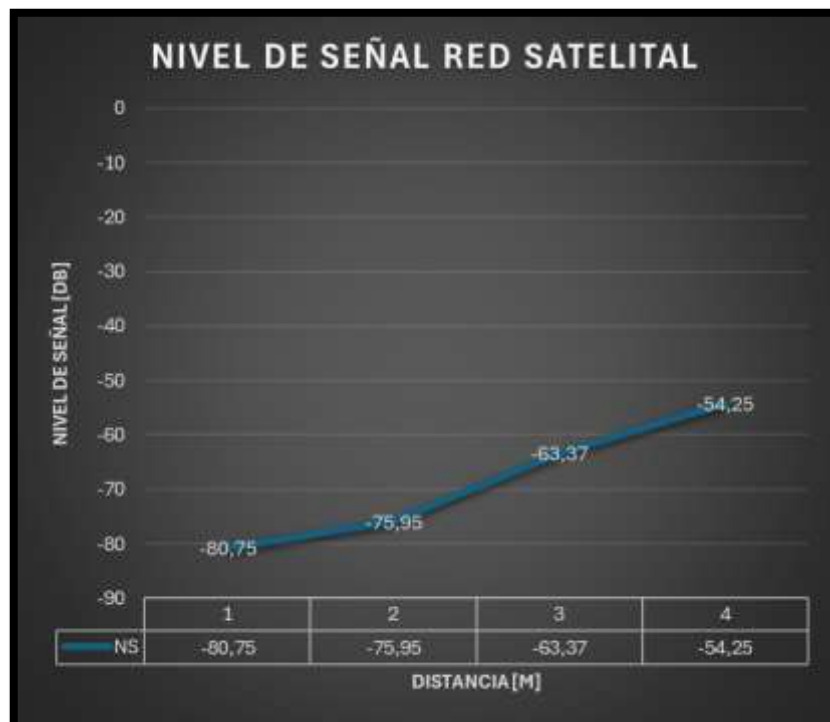


Figura 54. Resultado de Nivel de Señal en RED Satelital para Cada Segmento

4.1.2 Pruebas de Funcionamiento de Algoritmo Vertical Hand Over

Para comprobar el algoritmo de Vertical Hand Over diseñado mediante redes neuronales, se requiere hacer diversas pruebas para verificar la eficiencia de este, por lo que se divide las pruebas en 4 etapas, según el caso de calidad de señal. Para el primer caso se evalúa aleatoriamente 10 distancias dentro del rango de 0 a 3000 metros obteniendo los valores de entradas que se observan en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de Entradas para el Rango de 0 a 3000 Metros

| Prueba | Distancia (m) | BER4G | BERSAT | SNR4G (dB) | SNRSAT (dB) | LAT4G (ms) | LATSAT (ms) | NS4G (dB) | NSSAT (dB) |
|--------|------------------|----------|----------|---------------|----------------|---------------|----------------|--------------|---------------|
| 1 | 354 | 1,66E-09 | 0,007836 | 39,12 | 10,88 | 24,16 | 475,8 | -51,06 | -88,94 |
| 2 | 545 | 2,26E-09 | 0,007591 | 38,62 | 11,39 | 32,16 | 467,8 | -51,66 | -84,34 |
| 3 | 753 | 3,07E-09 | 0,007281 | 38,12 | 11,88 | 40,12 | 459,9 | -52,26 | -83,74 |
| 4 | 1048 | 4,86E-09 | 0,006686 | 37,38 | 12,62 | 51,92 | 448,1 | -53,14 | -82,86 |
| 5 | 1143 | 5,62E-09 | 0,006457 | 37,14 | 12,86 | 55,72 | 44,3 | -53,43 | -82,57 |
| 6 | 1308 | 7,26E-09 | 0,006019 | 36,73 | 13,27 | 62,32 | 437,7 | -53,92 | -82,8 |
| 7 | 1361 | 7,88E-09 | 0,005868 | 36,6 | 13,4 | 64,44 | 435,6 | -54,08 | -81,92 |
| 8 | 1481 | 9,49E-09 | 0,005509 | 36,3 | 13,7 | 69,24 | 430,8 | -54,44 | -81,56 |
| 9 | 1786 | 1,52E-08 | 0,004524 | 35,53 | 14,46 | 81,44 | 418,6 | -55,36 | -80,64 |
| 10 | 2567 | 5,09E-08 | 0,002133 | 33,58 | 16,42 | 112,7 | 387,3 | -57,7 | -78,3 |

Una vez ejecutado el algoritmo de redes neuronales implementado, se obtienen las salidas que se observan en la Tabla 10, en donde se identifica una mala estimación en cuanto a la calidad de señal a partir de la Prueba 2, en las salidas de Calidad 4G y Calidad Satelital, mientras que para la Salida que corresponde al Enlace que debe conectarse el dispositivo se tiene todos los valores como Verdaderos Positivos.

Tabla 10. Resultados de Predicción de Pruebas en Rango de 0 a 3000 Metros

| Prueba | CALIDAD 4G | COMPROBACION SAL1 | CALIDADS AT | COMPROBACION SAL2 | ENLACE E | COMPROBACION SAL3 |
|--------|---------------|----------------------|----------------|----------------------|-------------|----------------------|
| 1 | ÓPTIMA | VP | MALA | VP | 4G | VP |
| 2 | SN | FN | SN | FN | 4G | FP |

| | | | | | | |
|----|--------|----|-------|----|----|----|
| 3 | ÓPTIMA | VP | MALA | VP | 4G | VP |
| 4 | ÓPTIMA | VP | MALA | VP | 4G | VP |
| 5 | ÓPTIMA | VP | MALA | VP | 4G | VP |
| 6 | BUENA | FP | MEDIA | FP | 4G | FP |
| 7 | BUENA | FP | MEDIA | FP | 4G | FP |
| 8 | BUENA | FP | MEDIA | FP | 4G | FP |
| 9 | BUENA | FP | MEDIA | FP | 4G | FP |
| 10 | BUENA | FP | MEDIA | FP | 4G | FP |

De la misma manera, se ejecutaron 10 pruebas dentro del rango de 3001 a 6000 metros en donde se deben generar condiciones de calidad Media y Buena. Los datos generados para las entradas del algoritmo inteligente se los puede observar en la Tabla 11, en donde se generaron diferentes distancias aleatorias dentro del rango para la comprobación.

Tabla 11. Resultados de Entradas para el Rango de 3001 a 6000 metros

| Prueba | Distancia (m) | BER4G | BERSAT | SNR4G (dB) | SNRSAT (dB) | LAT4G (ms) | LATSAT (ms) | NS4G (dB) | NSSAT (dB) |
|--------|------------------|----------|-----------|---------------|----------------|---------------|----------------|--------------|---------------|
| 1 | 3303 | 1,59E-07 | 0,0008184 | 31,74 | 18,26 | 142,1 | 357,9 | -59,91 | -76,09 |
| 2 | 3324 | 1,64E-07 | 0,000796 | 31,69 | 18,31 | 143 | 357 | -59,97 | -76,03 |
| 3 | 3497 | 2,15E-07 | 0,0006209 | 31,26 | 18,74 | 149,9 | 350,1 | -60,49 | -75,51 |
| 4 | 3748 | 3,16E-07 | 0,0004304 | 30,63 | 19,37 | 159,9 | 340,1 | -61,24 | -74,76 |
| 5 | 3752 | 3,18E-07 | 0,0004279 | 30,62 | 19,38 | 160,1 | 339,9 | -61,26 | -74,74 |
| 6 | 4109 | 5,53E-07 | 0,0002511 | 29,73 | 20,27 | 174,4 | 325,6 | -62,33 | -73,67 |
| 7 | 4980 | 2,12E-06 | 6,63E-05 | 27,55 | 22,45 | 209,2 | 290,8 | -64,94 | -71,06 |
| 8 | 5633 | 5,83E-06 | 2,42E-05 | 25,92 | 24,08 | 235,3 | 264,7 | -66,9 | -69,1 |
| 9 | 5876 | 8,49E-06 | 1,66E-05 | 25,31 | 24,69 | 245 | 255 | -67,63 | -68,37 |
| 10 | 5989 | 1,01E-05 | 1,39E-05 | 25,03 | 24,97 | 249,6 | 250,4 | -67,97 | -68,03 |

Los resultados generados por el algoritmo de predicción diseñado se los puede observar en la Tabla 12, en donde se identifican una correcta clasificación tanto de las Salidas de Calidad 4G y Satelital, así como en la Salida que identifica que red debe conectarse dentro de ese rango y la cual corresponde al enlace 4G con una cantidad de 10 Verdaderos Positivos.

Tabla 12. Resultados de Predicción Pruebas en Rango 3001 a 6000 Metros

| Prueba | CALIDAD 4G | COMPROBACION SAL1 | CALIDAD AT | COMPROBACION SAL2 | ENLACE | COMPROBACION SAL3 |
|--------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|--------|----------------------|
| 1 | BUENA | VP | MEDIA | VP | 4G | VP |
| 2 | BUENA | VP | MEDIA | VP | 4G | VP |
| 3 | BUENA | VP | MEDIA | VP | 4G | VP |
| 4 | BUENA | VP | MEDIA | VP | 4G | VP |
| 5 | BUENA | VP | MEDIA | VP | 4G | VP |
| 6 | BUENA | VP | MEDIA | VP | 4G | VP |
| 7 | BUENA | VP | MEDIA | VP | 4G | VP |
| 8 | BUENA | VP | MEDIA | VP | 4G | VP |
| 9 | BUENA | VP | MEDIA | VP | 4G | VP |
| 10 | BUENA | VP | MEDIA | VP | 4G | VP |

Posteriormente se ejecutan las pruebas dentro del rango de 6001 a 9000 metros en donde existe una variación en la red que debería detectar el sistema, para lo cual se generaron 10 datos de distancia aleatorios dentro del rango establecido y los resultados de las entradas se los puede observar en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de Entradas en Rango de 6001 a 9000 Metros

| Prueba | Distancia (m) | BER4G | BERSAT | SNR4G (dB) | SNRSAT (dB) | LAT4G (ms) | LATSAT (ms) | NS4G (dB) | NSSAT (dB) |
|--------|------------------|-----------|----------|---------------|----------------|---------------|----------------|--------------|---------------|
| 1 | 6031 | 1,08E-05 | 1,31E-05 | 24,92 | 25,08 | 251,2 | 248,8 | -68,09 | -67,91 |
| 2 | 6657 | 2,84E-05 | 4,94E-06 | 23,36 | 26,64 | 276,3 | 223,7 | -69,97 | -66,03 |
| 3 | 6787 | 3,46E-05 | 4,04E-06 | 23,03 | 26,97 | 281,5 | 218,5 | -70,36 | -66,64 |
| 4 | 7268 | 7,26E-05 | 1,91E-06 | 21,83 | 28,17 | 300,7 | 199,3 | -71,8 | -64,2 |
| 5 | 7269 | 7,27E-05 | 1,91E-06 | 21,83 | 28,17 | 300,8 | 199,2 | -71,81 | -64,19 |
| 6 | 7363 | 8,39E-05 | 1,65E-06 | 21,59 | 28,41 | 304,5 | 195,5 | -72,09 | -63,91 |
| 7 | 7883 | 0,0001854 | 7,36E-07 | 20,29 | 29,71 | 325,3 | 174,7 | -73,65 | -62,35 |
| 8 | 7982 | 0,0002153 | 6,31E-07 | 20,04 | 29,95 | 329,3 | 170,7 | -73,95 | -62,05 |
| 9 | 8089 | 0,0002529 | 5,34E-07 | 19,78 | 30,22 | 333,6 | 166,4 | -74,27 | -61,73 |
| 10 | 8721 | 0,0006408 | 2,00E-07 | 18,2 | 31,8 | 358,8 | 141,2 | -76,16 | -59,84 |

En la Tabla 14, se puede observar los resultados de la predicción en base a las pruebas realizadas dentro del rango de 6001 a 9000 metros, en esto se puede observar que, en la prueba de 6031 metros, el sistema entrega un Falso Negativo en las tres salidas, mientras que en la prueba a 8721 metros se obtiene un Falso Positivo, mientras que en las otras 8 observaciones se tiene una detección correcta del tipo de red que debe ser conectada.

Tabla 14. Resultados de Predicción en Pruebas de Rango 6001 a 9000 Metros

| Prueba | Distancia | CALIDAD | COMPROBACION | CALIDAD | COMPROBACIÓN | ENLACE | COMPROBACIÓN |
|--------|-----------|---------|--------------|---------|--------------|-----------|--------------|
| | | 4G | SAL1 | SAT | SAL2 | | SAL3 |
| 1 | 6031 | BUENA | FN | MEDIA | FN | 4G | FN |
| 2 | 6657 | MEDIA | VP | BUENA | VP | SATELITAL | VP |
| 3 | 6787 | MEDIA | VP | BUENA | VP | SATELITAL | VP |
| 4 | 7268 | MEDIA | VP | BUENA | VP | SATELITAL | VP |
| 5 | 7269 | MEDIA | VP | BUENA | VP | SATELITAL | VP |
| 6 | 7363 | MEDIA | VP | BUENA | VP | SATELITAL | VP |
| 7 | 7883 | MEDIA | VP | BUENA | VP | SATELITAL | VP |
| 8 | 7982 | MEDIA | VP | BUENA | VP | SATELITAL | VP |
| 9 | 8089 | MEDIA | VP | BUENA | VP | SATELITAL | VP |
| 10 | 8721 | MALA | FP | ÓPTIMA | FP | SATELITAL | FP |

Finalmente, se realizan las pruebas respectivas dentro del rango de 9001 a 12000 metros, en donde se genera una notable disminución de la calidad de la señal 4G y un incremento en la señal Satelital. En la Tabla 15 se puede observar los resultados de la simulación de cada una de las pruebas realizadas en este rango de distancia.

Tabla 15. Resultados de Entradas para el Rango de 9001 a 12000 Metros

| Prueba | Distancia | BER4G | BERSAT | SNR4G | SNRSAT | LAT4G | LATSAT | NS4G | NSSAT |
|--------|-----------|----------|----------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | | | | (dB) | (dB) | (ms) | (ms) | (dB) | (dB) |
| 1 | 9617 | 0,002094 | 4,98E-08 | 15,96 | 34,04 | 394,7 | 105,3 | -78,85 | -57,15 |
| 2 | 9652 | 0,002181 | 4,72E-08 | 15,87 | 34,13 | 396,1 | 103,9 | -78,96 | -57,09 |
| 3 | 9733 | 0,002391 | 4,16E-08 | 15,67 | 34,33 | 399,3 | 100,7 | -79,2 | -56,8 |
| 4 | 10107 | 0,003501 | 2,33E-08 | 14,73 | 35,27 | 414,3 | 85,72 | -80,32 | -55,68 |
| 5 | 10267 | 0,004024 | 1,81E-08 | 14,33 | 35,67 | 420,7 | 79,32 | -80,8 | -55,2 |

| | | | | | | | | | |
|-----------|-------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 6 | 10983 | 0,006251 | 5,96E-09 | 12,54 | 37,46 | 449,3 | 50,68 | -82,95 | -53,05 |
| 7 | 11305 | 0,007001 | 3,62E-09 | 11,74 | 38,26 | 462,2 | 37,8 | -83,91 | -52,09 |
| 8 | 11355 | 0,0071 | 3,35E-09 | 11,61 | 38,39 | 464,2 | 35,8 | -84,06 | -51,94 |
| 9 | 11693 | 0,007642 | 1,98E-09 | 10,77 | 39,23 | 477,7 | 22,28 | -85,08 | -50,92 |
| 10 | 11776 | 0,007746 | 1,74E-09 | 10,56 | 39,44 | 481 | 18,96 | -85,33 | -50,67 |

En la Tabla 16 se muestran los resultados de la predicción en las pruebas dentro del rango respectivo en donde se puede visualizar que existe una cantidad de 10 Verdaderos Positivos lo que indica que se realiza de manera correcta la clasificación con el sistema de red neuronal diseñado.

Tabla 16. Resultados de Predicción en Pruebas de Rango 9001 a 12000

| Prueba | Distancia | CALIDAD 4G | COMPROBACION SAL1 | CALIDAD SAT | COMPROBACIÓN SAL2 | ENLACE | COMPROBACIÓN SAL3 |
|---------------|------------------|-------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|---------------|--------------------------|
| 1 | 9617 | MALA | VP | ÓPTIMA | VP | SATELITAL | VP |
| 2 | 9652 | MALA | VP | ÓPTIMA | VP | SATELITAL | VP |
| 3 | 9733 | MALA | VP | ÓPTIMA | VP | SATELITAL | VP |
| 4 | 10107 | MALA | VP | ÓPTIMA | VP | SATELITAL | VP |
| 5 | 10267 | MALA | VP | ÓPTIMA | VP | SATELITAL | VP |
| 6 | 10983 | MALA | VP | ÓPTIMA | VP | SATELITAL | VP |
| 7 | 11305 | MALA | VP | ÓPTIMA | VP | SATELITAL | VP |
| 8 | 11355 | MALA | VP | ÓPTIMA | VP | SATELITAL | VP |
| 9 | 11693 | MALA | VP | ÓPTIMA | VP | SATELITAL | VP |
| 10 | 11776 | MALA | VP | ÓPTIMA | VP | SATELITAL | VP |

Una vez generados todas las pruebas dentro del rango total de 0 a 12000 metros se procede a realizar un análisis mediante la matriz de confusión o matriz de error que se observa en la Tabla 17, en donde se obtuvieron una cantidad de Verdaderos Positivos, Falsos Positivos, Verdaderos Negativos y Falsos Negativos. Mediante la Ecuación (1) y Ecuación (2) se puede observar los parámetros de exactitud que corresponde a un 80% con una precisión del 96.9% para la red neuronal diseñada para el Vertical HandOver.

Tabla 17. Matriz de Confusión de Salida de Predicción de Enlace

| | |
|--|---|
| Verdaderos Positivos 32 | Falsos Positivos 7 |
| Falsos Negativos 1 | Verdaderos Negativos 0 |

$$Exactitud = \frac{VP + VN}{VP + FP + FN + VN} = 0.8 = 80\% \quad (1)$$

$$Precisión = \frac{VP}{VP + FP} = 0.969 = 96.9\% \quad (2)$$

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Dentro de la investigación se efectúa un análisis de las características, parámetros y métodos de predicción los cuales permiten realizar de manera correcta un sistema de Vertical HandOver. Se identifican diversos estudios los cuales utilizan parámetros como ancho de banda, latencia, BER, SNR, entre otros para generar sistemas inteligentes que en base a las condiciones de entrada efectúan una predicción del tipo de enlace al cuál debe conectarse el dispositivo móvil.
- Se ha desarrollado mediante el Software Matlab un sistema de comunicación Satelital y un Sistema de Comunicación 4G LTE en donde se colocan los bloques necesarios para poder recopilar la información de las variables de SNR, BER, Nivel de Señal y Latencia de un dispositivo conectado al tipo de redes analizadas. Para esto se realiza una estimación en donde la distancia recorrida se correlaciona directamente con el SNR lo que permite generar una base de datos de 3000 muestras con un intervalo de 200 metros de distancia para cubrir un área de 12Km lo cual conforma el área de cobertura de ambas redes analizadas.
- Con los datos de las diferentes variables de calidad de señal obtenidas e identificados los rangos en donde el sistema se conecta a cada red, se genera la matriz de datos de entrenamiento, mediante la herramienta NEURAL NET FITTING se diseña una red neuronal de 2 capas ocultas con 5 neuronas en la primera capa, misma que genera un sistema con un error de 0.127 y una regresión de 0.994 para el 15% de los datos testeados por la red.
- De la misma manera, se implementa una segunda red neuronal modificando la estructura a 10 neuronas en la primera capa oculta, en donde se obtiene como resultado un error de $1.3529e-6$ y una regresión de 1.000 lo que muestra una mejora considerable en la red, tomando en cuenta que el 15% de los 3000 datos generados sirvió como test. Con estos resultados se procede a utilizar la estructura de la red para realizar las pruebas pertinentes y así implementar el sistema predictivo de Vertical Hand Over.
- Finalmente, se ejecutan las pruebas de simulación y predicción del algoritmo diseñado en base a la red que obtuvo un mejor resultado de error y regresión. Para

esto se generan 40 pruebas, 10 en cada rango de calidad de señal para poder identificar alguna detección que no corresponda a lo que busca el algoritmo. Con estas pruebas se genera una matriz de confusión o matriz de error en donde se observa que se tiene una cantidad de 32 verdaderos positivos generados por el sistema, 7 falsos positivos y 1 falso negativo, con lo que se estima una Exactitud del 80% y una Precisión del 96.9% lo que muestra un sistema que posee confiabilidad en la detección del tipo de red en la que el dispositivo móvil se puede conectar dependiendo de la calidad de señal.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda ampliar la base de pruebas, para ello se debe disminuir el intervalo de los rangos de distancia, para generar una base de datos de entrenamiento nueva que permita mejorar la cantidad de falsos negativos que se pudieron obtener en el sistema realizado.
- Se sugiere incrementar las pruebas realizadas en los puntos donde se obtuvo una menor cantidad de falsos negativos, para identificar las zonas que el sistema puede cometer errores y así buscar la ampliación de la base de datos dentro de esos rangos.
- Se aconseja aumentar el número de entradas o estimaciones de la calidad de señal con parámetros que integren la experiencia de usuario con el objetivo de buscar mejoras en el sistema planteado actualmente.
- Finalmente, se propone analizar los sistemas de comunicación considerando nodos de repetición para ampliar la cobertura y generar una nueva base de datos tomando en cuenta transiciones entre redes homogéneas y heterogéneas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Quiñones, H. Pachar, J. Martínez, L. Quiñones y R. Torres, «Desarrollo y evaluación de un gateway móvil IoT para redes 4G LTE,» *Enfoque UTE*, vol. 11, nº 4, pp. 16-26, 2020.
- [2] C. Parreño, «Simulación en MATLAB de un algoritmo basado en Machine Learning y Hard HandOver para el balanceo de carga en una red celular LTE,» 2021.
- [3] C. Rocha, «Propuesta de un modelo predictivo para identificar factores que se manifiestan en las fallas de HandOver en red LTE utilizando mediciones de campo y un árbol de decisión en R Studio (Caso de Estudio VoIP),» 2022.
- [4] R. Barreto, «Mecanismo de selección de red con incertidumbre en el proceso del handover vertical,» 2013.
- [5] M. K. V. B. & M. Subramani, «Fuzzy logic-based handover requirement analysis and access network selection for device-to-device communication.,» *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 30, nº 1, 2021.
- [6] E. Cruz, «Evaluación de parámetros de handover en una red LTE mediante el Software ICS-Designer,» 2018.
- [7] K. Escudero, «Análisis y simulación a través de un modelo matemático para reducir el efecto handover ping pong en una red 4G,» 2021.
- [8] S. Radouche y C. Leghris, «Network selection based on Cosine Similarity and Combination of Subjective and Objective Weighting,» *2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, pp. 1-7, 2020.
- [9] S. Goutam y A. K. S. Unnikrishnan, «Algorithm for vertical handover decision using geometric mean and MADM techniques,» *Int. j. inf. tecnol*, vol. 14, pp. 2691-2699, 2022.

- [10] R. Acosta, «Análisis del algoritmo de HandOver reactivo y proactivo en sistemas FEMTOCELDA para la tecnología 4G (Long Term Evolution-Advanced),» 2018.
- [11] M. Subramani y V. B. Kumaravelu, «A fuzzy based vertical handover network selection scheme,» *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 17, n° 1, pp. 324-330, 2020.
- [12] Ministerio de Telecomunicaciones Ecuador, «Nuevo satélite Hughes Júpiter 3 de ultra alta densidad estará disponible para Ecuador,» Boletín Oficial 031, 22 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/nuevo-satelite-hughes-jupiter-3-de-ultra-alta-densidad-estara-disponible-para-ecuador/>. [Último acceso: 20 Enero 2024].
- [13] G. Rodrigues, «Serviços Pós-4G em Redes de Satélite LEO com Recepção Multi-Pacote e com Handover,» 2012.
- [14] S. U. S. P. S. S. & K. A. Goutam, «Algorithm for vertical handover decision using least cost function.,» *IEIE Transactions on Smart Processing & Computing*, vol. 10, n° 1, pp. 44-54, 2021.
- [15] J. Minaya y Y. Pérez, «Optimización de la cobertura de la red 4G LTE del operador América Móvil, en el distrito de San Antonio, Provincia Mariscal Nieto, Región Moquegua,» 2022.
- [16] H. Cardoza, «Diseño y planificación de una red movil 4G LTE para localidades sin telefonía movil del Distrito de Chulucanas, Morropon, Piura,» 2022.
- [17] H. Figueroa y J. Obando, «Análisis del proceso de Implementación de redes 4G en Colombia dentro del plan de transición a nuevas tecnologías.,» 2021.
- [18] C. Flores, «Estudio de la infraestructura y el espectro radioeléctrico en la evolución de la tecnología 4G y su convergencia a 5G en redes de telefonía móvil en el ecuador,» 2022.
- [19] G. Melendez, «Optimización de redes satelitales de datos mediante el uso de satelites de orbita baja,» 2021.

- [20] G. Herrera, «Estudio de un plan de masificación de banda ancha en el Ecuador aplicando el modelo coreano,» 2019.
- [21] D. Tanda, «Handover y transmisión multipunto coordinada en redes VLC.,» 2021.
- [22] K. Puchaicela, «Asignación de recursos para comunicaciones D2D en redes heterogéneas,» 2020.
- [23] M. Eguizabal, «Gestión de recursos radio en sistemas móviles avanzados de banda ancha con soluciones de extensión de cobertura y capacidad basados en despliegues de red heterogénea,» Universidad de Zaragoza. [Tesis doctoral], Zaragoza, 2020.
- [24] V. Parraga, C. Rocha, H. Navarrete y P. Lupera, «Modelos Predictivos de Zonas de Handover en Redes LTE con Base a Mediciones de Campo y Arboles de Decision (Caso de Estudio Ciudad de Quito),» *Revista Politécnica*, vol. 52, nº 1, 2023.
- [25] J. Cervantes, «Protocolo Cross-Layer proactivo basado en técnicas de inteligencia artificial para handover sin fisuras en ambientes móviles WLAN,» 2020.
- [26] «Patent and Trade-mark Office». Washington, DC: U.S. Patente 8,116,692, 2012.
- [27] Grupo de Topología Computacional y Matemática Aplicada, «Conceptos básicos sobre redes neuronales,» Universidad de Sevilla, Universidad de Sevilla, s.f..
- [28] A. M. Narváez V. y J. V. Vizcaya G., «Aplicación de las redes neuronales artificiales y teoría de juegos al cambio climático con control óptimo,» *Entornos*, vol. 29, nº 2, pp. 371-381, 2016.
- [29] A. E. Rodríguez M., «Redes neuronales bayesianas usando inferencia variacional: una aplicación en la clasificación de imágenes,» Universidad Nacional Autónoma de México. [Tesis de pregrado], Ciudad de México, 2023.

- [30] M. Díaz, «Diseño de una aplicación Android para monitorear los indicadores de calidad de la señal de una red 4G-LTE,» 2021.
- [31] Hughes, «Hughes JUPITER™ 3 Satélite de Ultra Alta-Densidad de Próxima Generación,» 08 07 2024. [En línea]. Available: <https://www.hughes.com/mx/jupiter-3>.
- [32] MathWorks, «Enlace satelital RF,» 08 07 2024. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/comm/ug/rf-satellite-link.html>.
- [33] MathWorks, «Transmisor y receptor OFDM,» 10 07 2024. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/comm/ug/ofdm-transmitter-and-receiver.html?searchHighlight=ofdm%20g&s_tid=srchtitle_support_results_12_ofdm%20g.
- [34] MathWorks, «Integer-Input RS Encoder,» 10 07 2024. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/comm/ref/integerinputrsencoder.html?searchHighlight=rs%20encoder%20&s_tid=srchtitle_support_results_3_rs%20encoder%20.
- [35] MathWorks, «Interleaving,» 10 07 2024. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/comm/ug/interleaving.html?searchHighlight=convolutional%20inter&s_tid=srchtitle_support_results_1_convolutional%20inter.
- [36] MathWork, «Convolutional Encoder,» 10 07 2024. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/comm/ref/convolutionalencoder.html?searchHighlight=Convolutional%20Encoder&s_tid=srchtitle_support_results_1_Convolutional%20Encoder#fp518984.
- [37] MathWorks, «Rectangular QAM Modulator Baseband,» 10 07 2024. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/comm/ref/rectangularqammodulatorbaseband.html?searchHighlight=modulator%2064qam&s_tid=srchtitle_support_results_2_modulator%2064qam.
- [38] MathWorks, «OFDM Modulator,» 10 07 2024. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/wireless->

hdl/ref/ofdmmodulator.html?searchHighlight=OFDM&s_tid=srchtitle_support_results_5_OFDM.

- [39] Á. Daboín, G. Verde, F. Torrealba y T. Gharbi, «Medición de RSSI, LQI y pruebas de cobertura para diferentes escenarios de propagación en una red inalámbrica de sensores,» *Revista Digital de Investigación y Postgrado*, vol. 2, nº 1, 2012.
- [40] AWS, «¿Qué es la latencia de red?,» 10 07 2024. [En línea]. Available: <https://aws.amazon.com/es/what-is/latency/>.
- [41] Telefónica, «Qué es la latencia y por qué es tan importante que sea baja,» 10 07 2024. [En línea]. Available: <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/que-es-latencia/>.
- [42] AXESS, «¿QUÉ ES UN ENLACE SATELITAL Y CÓMO FUNCIONA?,» 10 07 2024. [En línea]. Available: <https://axessnet.com/clientes/preguntas/#:~:text=%C2%BFQU%C3%89%20ES%20LA%20LATENCIA%20SATELITAL,llegar%20y%20regresar%20del%20sat%C3%A9lite..>
- [43] MathWorks, «Find Delay,» 10 07 2024. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/comm/ref/finddelay.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_find%20delay.
- [44] VIAVI, «Pruebas de la tasa de errores de bits (BERT),» 10 07 2024. [En línea]. Available: <https://www.viavisolutions.com/es-es/productos/pruebas-de-la-tasa-de-errores-de-bits-bert>.
- [45] MathWorks, «Error Rate Calculation,» 10 07 2024. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/comm/ref/errorrateratecalculation.html?searchHighlight=ERROR%20RATE&s_tid=srchtitle_support_results_1_ERROR%20RATE.
- [46] N. Vara, G. Poletto, M. Cáceres y A. Busso, «CÁLCULO DE DISTANCIA ENTRE LOS NODOS DE UNA RED INALÁMBRICA ZIGBEE EN

FUNCION DEL PARAMETRO RSSI,» *EXTENSIONISMO, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA*, vol. 2, pp. 8 - 13, 2015.

- [47] Teltonika, «¿QUÉ SIGNIFICAN RSSI Y RSRP EN LA CONFIGURACIÓN DE SU RED?,» 19 03 2024. [En línea]. Available: <https://teltonika-networks.com/es/newsroom/what-do-rssi-rsrp-mean-in-your-network-setup>.
- [48] MathWorks, «Power Meter,» 10 07 2024. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/dsp/ref/powermeter.html?searchHighlight=pow%20meter&s_tid=srchtitle_support_results_1_power%20meter.
- [49] J. Perez, M. Zabala, A. Pazmiño y H. Moreno, «Análisis de calidad de servicio en la transmisión por AM digital mediante el uso de códecs en USRP.,» *Conciencia Digital*, vol. 3, nº 2, 2020.
- [50] ZInformatica, «Que alcance máximo tiene la antena 4g ?,» 10 07 2024. [En línea]. Available: [https://www.zoominformatica.com/pregunta-\(6506\).php#:~:text=Con%20antenas%204G%20pueden%20conseguirse,hasta%2010%2D12%20km...](https://www.zoominformatica.com/pregunta-(6506).php#:~:text=Con%20antenas%204G%20pueden%20conseguirse,hasta%2010%2D12%20km...)
- [51] A. Prithiviraj, A. Maheswari, D. Balamurugan, V. Ravi, K. M, R. Alroobaea, S. Rubaiee y S. S, «Multi-Criteria Fuzzy-Based Decision Making Algorithmto Optimizethe VHO Performancein Hetnets,» *Computers,Materials&Continua*, vol. 70, nº 1, 2021.
- [52] A. Almutairi, M. Al-Gharabally y A. Salman, «Particle Swarm Optimization Application for Multiple Attribute Decision Making in Vertical Handover in Heterogenous Wireless Networks,» *Journal of Engineering Research*, vol. 9, nº 1, 2021.
- [53] G. López Pradas, «Capítulo 2: LTE o la cuarta generación (4G) de comunicaciones móviles,» Sevilla, 2011.
- [54] E. Carrillo, N. Velandia y N. Villa, «Diseño de un enlace satelital como Sistema backhaul de comunicaciones móviles,» 2018.

ANEXOS

ANEXO A - Retropropagación con Gradiente Conjugado

Sea $J(w)$ la función de pérdida que queremos minimizar, donde w representa los pesos de la red. El método se define por:

1. Cálculo del gradiente:

$$g_k = \nabla J(w_k)$$

2. Dirección de descenso inicial:

- En la primera iteración, la dirección de descenso es el gradiente negativo:

$$d_0 = -g_0$$

3. Actualización de pesos:

$$w_{k+1} = w_k + \alpha_k d_k$$

Donde α_k corresponde al tamaño de paso (se determina por búsqueda en línea).

4. Cálculo del nuevo gradiente:

$$g_{k+1} = \nabla J(w_{k+1})$$

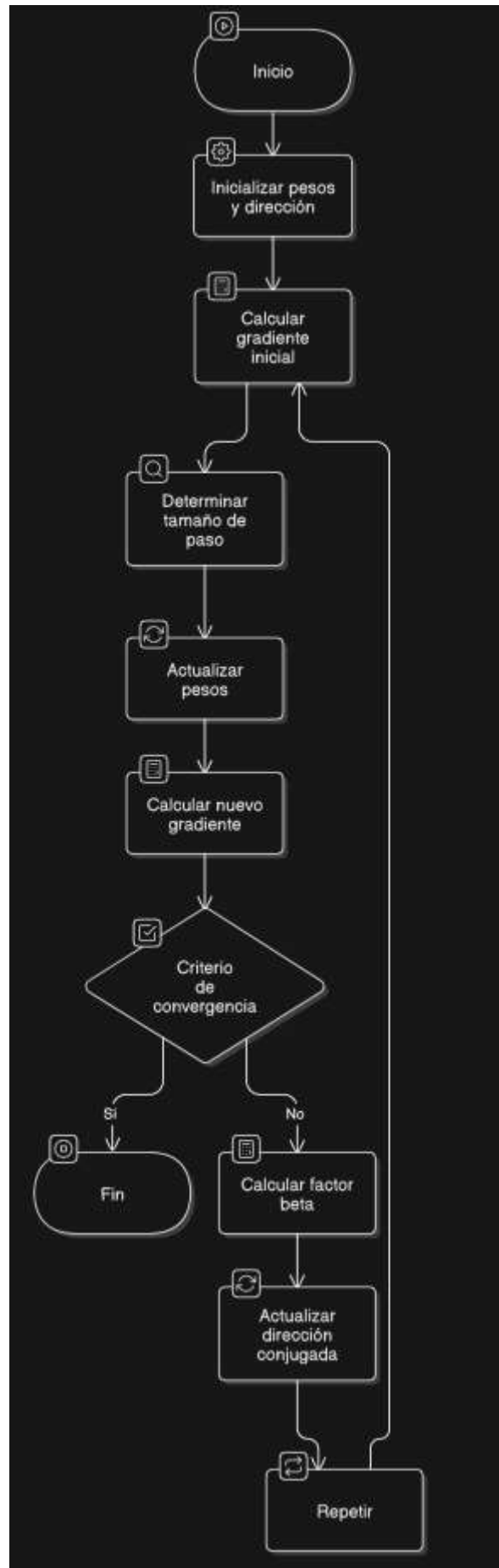
5. Factor beta (Fletcher-Reeves):

$$\beta_k = \frac{g_{k+1}^T * g_{k+1}}{g_k^T * g_k}$$

6. Actualización de la dirección conjugada:

$$d_{k+1} = -g_{k+1} + \beta_k d_k$$

Este proceso se repite hasta que el gradiente sea lo suficientemente pequeño (criterio de convergencia). Adicionalmente se presenta el diagrama de flujo que indica el funcionamiento de este método de actualización de pesos.



ANEXO B - Regularización Bayesiana

Se basa en el teorema de Bayes:

$$P(w|D) = \frac{P(D|w) P(w)}{P(D)}$$

Donde:

- $P(w|D)$: probabilidad posterior de los parámetros dados los datos.
- $P(D|w)$: verosimilitud de los datos dado el modelo.
- $P(w)$: probabilidad previa de los parámetros.
- $P(D)$: probabilidad marginal de los datos.

El objetivo principal de esta función es encontrar los pesos w que maximizan la probabilidad posterior $P(w|D)$, que equivale a minimizar una función de costo:

$$\text{Costo}(w) = -\log P(D|w) - \log P(w)$$

Esto combina el ajuste a los datos $-\log P(D|w)$ con una penalización por complejidad del modelo $-\log P(w)$. Las técnicas bayesianas ajustan automáticamente los hiperparámetros de regularización mediante el cálculo de probabilidades. El modelo matemático se lo puede representar:

1. Función de Costo Regularizada:

$$\mathcal{L}(w) = E_D(w) + \lambda E_w(w)$$

Donde:

- $E_D(w)$: término de error sobre los datos.
- $\lambda E_w(w)$: término de regularización (priori).
- λ : hiperparámetro que balancea los dos términos.

2. Optimización de la Posterior:

Se usan técnicas como gradiente descendente o métodos numéricos, para ajustar los pesos y minimizar $\mathcal{L}(w)$.

3. Ajuste de Hiperparámetros:

Se actualiza λ y otros hiperparámetros basándose en las distribuciones posteriores, usando métodos como evidencia marginal o Monte Carlo.

Adicionalmente se muestra el diagrama de flujo que representa este modelo.

