



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**EVALUACIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO EN TELEMEDICINA INDEPENDIENTE DE  
LA INFRAESTRUCTURA DE RED DE DATOS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero en Telecomunicaciones

**AUTOR:** BLADIMIR ALEXANDER USHIÑA HARO

**TUTOR:** FLAVIO VINICIO CHANGOLUISA PANCHI

Quito-Ecuador

2025

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Bladimir Alexander Ushiña Haro con documento de identificación N° 1719461988, manifiesto que:

Soy autor y responsable del presente trabajo, por lo cual autorizo a que, sin fines de lucro, la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 21 de Julio del año 2025

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Bladimir Alexander Ushiña Haro', written over a horizontal line.

---

Bladimir Alexander Ushiña Haro

1719461988

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Bladimir Alexander Ushiña Haro con documento de identificación N° 1719461988, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del artículo académico: “Evaluación de calidad de servicio en telemedicina independiente de la infraestructura de red de datos” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 21 de Julio del año 2025

Atentamente,



---

Bladimir Alexander Ushiña Haro

1719461988

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Flavio Vinicio Changoluisa Panchi con documento de identificación N° 1718483082, docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO EN TELEMEDICINA INDEPENDIENTE DE LA INFRAESTRUCTURA DE RED DE DATOS, realizado por Bladimir Alexander Ushiña Haro con documento de identificación N° 1719461988, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 21 de Julio del año 2025

Atentamente,



---

Ing. Flavio Vinicio Changoluisa Panchi, PhD.

1718483082

## DEDICATORIA

*Este proyecto de investigación se lo dedico con todo mi amor a mi mayor inspiración, mis padres, por ser los mejores padres del mundo, por brindarme su amor y apoyo incondicional en cada momento, sea este bueno o malo, y por sus valiosos consejos, que han guiado mis pasos y me han permitido culminar mis estudios, con el apoyo que siempre me han brindado día a día en el transcurso de cada etapa de mi carrera.*

**Bladimir Alexander Ushiña Haro**

## AGRADECIMIENTO

*Mi profundo agradecimiento a Dios por bendecirme y guiarnos en cada aspecto e instante a lo largo de mi carrera profesional y vida personal.*

*A mis padres por su apoyo y su amor incondicional, que contribuyeron para que lo difícil sea más fácil para culminar con éxito esta etapa tan importante de mi vida.*

*Al tutor por brindarme su ayuda incondicional como guía y orientación durante la realización de este proyecto de investigación.*

*A cada uno de los docentes de la carrera de Telecomunicaciones que fueron partícipes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta, por haber contribuido en mi formación profesional, compartiéndome sus amplios y sabios conocimientos.*

**Bladimir Alexander Ushiña Haro**

# EVALUACIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO EN TELEMEDICINA INDEPENDIENTE DE LA INFRAESTRUCTURA DE RED DE DATOS.

Ushiña Haro Bladimir Alexander, Changoluisa Panchi Flavio Vinicio.

## Resumen

El presente trabajo evalúa los parámetros de QoS necesarios para garantizar la transmisión confiable de señales biomédicas en entornos de telemedicina, considerando distintos escenarios de infraestructura de red. Se desarrolló una simulación computacional en Matlab, donde se modeló la transmisión de señales médicas como ECG, EEG, imágenes diagnósticas (TAC, rayos X) y secuencias de video sobre un canal ruidoso del tipo AWGN, utilizando modulación QPSK y sin aplicar técnicas de codificación de canal, con el objetivo de evaluar el desempeño bajo condiciones realistas y con recursos limitados. Como parte del análisis, se compararon diversas tecnologías de comunicación disponibles, como una opción técnicamente viable para entornos donde el acceso a tecnologías más avanzadas es limitado. Los resultados demostraron que es posible alcanzar una calidad diagnóstica aceptable si el SNR supera los 9.5 dB, con un BER inferior a  $10^{-3}$ . Este estudio contribuye a establecer lineamientos técnicos para la implementación eficiente de servicios de salud digital, incluso en regiones con infraestructura de red restringida.

**Palabras clave:** Telemedicina, LTE 4G, QoS, ECG, EEG, BER, SNR, AWGN, MATLAB.

## Abstract

This work evaluates the QoS parameters necessary to guarantee the reliable transmission of biomedical signals in telemedicine environments, considering different network infrastructure scenarios. A computational simulation was developed in Matlab, where the transmission of medical signals such as ECG, EEG, diagnostic images (CT, X-rays) and video sequences was modeled over a noisy AWGN channel, using QPSK modulation and without applying channel coding techniques, with the objective of evaluating the performance under realistic conditions and with limited resources. As part of the analysis, various available communication technologies were compared, as a technically viable option for environments where access to more advanced technologies is limited. The results demonstrated that it is possible to achieve acceptable diagnostic quality if the SNR exceeds 9.5 dB, with a BER lower than  $10^{-3}$ . This study contributes to establishing technical guidelines for the efficient implementation of digital health services, even in regions with restricted network infrastructure.

**Keywords:** Telemedicine, LTE 4G, QoS, ECG, EEG, BER, SNR, AWGN, MATLAB.

---

<sup>1</sup>Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: bushinah@est.ups.edu.ec

<sup>2</sup>Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: fchangoluisa@ups.edu.ec

## 1. Introducción

La telemedicina ha emergido como una herramienta fundamental para brindar servicios de salud a distancia, especialmente en zonas rurales o con infraestructura limitada, donde el acceso a atención médica especializada es escaso. Este enfoque, impulsado por los avances en tecnologías de comunicación digital, permite la transmisión remota y segura de diversos tipos de información clínica, como señales biomédicas como electrocardiograma (electrocardiogram, ECG) e electroencefalograma (electroencephalogram, EEG), imágenes médicas: tomografía axial computarizada (Computed axial tomography, TAC), rayos X (X-ray Imaging), y videoconferencias para consultas médicas en tiempo real [1] [2].

Sin embargo, la efectividad de estos servicios depende directamente de la calidad de la red de datos disponible. La variabilidad e insuficiencia en los parámetros de Calidad de Servicio (Quality of Service, QoS), tales como el ancho de banda, la latencia, la pérdida de paquetes y la relación señal/ruido (Signal/Noise Ratio, SNR), representa un obstáculo crítico en escenarios reales. Durante la pandemia por COVID-19, se reportaron incrementos significativos en la tasa de error de bit (bit error rate, BER) y pérdida de paquetes en redes, afectando la transmisión en tiempo real de datos médicos sensibles [3].

Este problema se acentúa en zonas rurales de países en desarrollo, donde la infraestructura de red suele ser deficiente. Estudios recientes destacan la necesidad urgente de mejorar la QoS en contextos donde el monitoreo remoto de pacientes en tránsito o ubicaciones aisladas es vital [4].

En aplicaciones críticas como la monitorización ECG y EEG, un SNR mínimo es indispensable para preservar la fidelidad diagnóstica. Con lo cual, esta investigación ha identificado que valores por debajo de 7.8 dB únicamente permiten visualizar parámetros básicos, sin que se conserve información suficiente para un análisis clínico completo [5]. Ante esta realidad, resulta fundamental determinar qué parámetros mínimos de QoS son aceptables para que las señales biomédicas puedan ser transmitidas sin comprometer su utilidad diagnóstica.

Ante esta situación, surgen preguntas de investigación esenciales: ¿Cuáles son los umbrales mínimos de ancho de banda (Bandwidth, BW), velocidad de transmisión, latencia, jitter y SNR) que aseguran que las señales biomédicas puedan transmitirse sin pérdida diagnóstica en entornos evolución a largo plazo (Long Term Evolution, LTE)?, ¿Hasta qué punto las redes LTE están preparadas para soportar simultáneamente flujos heterogéneos (videos, imágenes y señales biomédicas) con la fidelidad necesaria para un diagnóstico remoto confiable? Por ello, el presente estudio tiene como objetivo evaluar mediante simulación los

requisitos mínimos de QoS necesarios para transmitir señales biomédicas (ECG, EEG, TAC, rayos X y videolamadas clínicas), sin uso de codificación de canal como corrección de errores hacia adelante (forward error correction, FEC), sobre un canal ruidoso tipo AWGN. Se analizaron los resultados obtenidos para determinar si tecnologías móviles existentes, como LTE 4G, son viables como plataforma de transmisión médica en tiempo real en regiones con infraestructura limitada.

Finalmente, este documento se estructura de la siguiente manera: la sección 2 describe la metodología utilizada en la simulación, la sección 3 analiza los parámetros de QoS para distintos tipos de señales médicas, la sección 4 presenta los resultados experimentales, la sección 5 discute los hallazgos y su relevancia en contextos reales y la sección 6 expone las conclusiones generales del estudio.

## 2. Metodología

Se utilizó MATLAB R2022b junto con la LTE Toolbox™ para realizar una simulación end-to-end de un enlace físico LTE 4G. La herramienta permitió generar la forma de onda conforme a los canales de medición de referencia (Reference Measurement Channels, RMC) definidos por el 3GPP, aplicando la modulación QPSK y evaluando el desempeño en términos de BER bajo condiciones de canal de Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (Additive White Gaussian Noise, AWGN) [6]. Esta simulación se basó en la identificación, caracterización y evaluación de los parámetros técnicos y de QoS requeridos para la transmisión eficiente de señales biomédicas a través de una red LTE, en el contexto de aplicaciones de telemedicina. Para cada tipo de señal, se establecieron los requerimientos mínimos de transmisión, técnicas de corrección de errores, protocolos de comunicación y valores esperados de los principales indicadores de desempeño de red. Estos parámetros fueron implementados o simulados dentro del entorno MATLAB con el objetivo de evaluar la degradación de calidad a través del canal AWGN bajo distintos niveles de SNR.

Para la preparación e incorporación de las señales biomédicas, se realizó una revisión bibliográfica en libros y artículos científicos actualizados. Esta investigación permitió establecer los criterios de la QoS requeridos para garantizar una transmisión confiable, especialmente en entornos donde se necesita alta disponibilidad. Se consideró el uso de sistemas redundantes como medida para mitigar interrupciones en la comunicación médica crítica. Además, se identificaron como factores clave de la QoS la pérdida de paquetes, la latencia del sistema de comunicaciones, el retardo en la transmisión, así como la fiabilidad y disponibilidad general de la red [7]. Se estableció un canal AWGN con modulación QPSK, sin aplicar técnicas

de codificación de canal FEC, con el fin de evaluar el desempeño de transmisión bajo condiciones realistas de infraestructura limitada, tal como se ha realizado en estudios previos que simulan enlaces base de LTE para evaluar umbrales críticos de QoS en aplicaciones médicas [8] [9].

Los parámetros de la simulación fueron seleccionados en base a configuraciones estandarizadas por 3GPP y ejemplos de referencia de MathWorks [10], ancho de banda de 10 MHz, sistema 1×1 (SISO), y un rango de variación de SNR de 0 a 10 dB en pasos de 0.5 dB. Para cada nivel de SNR se transmitieron múltiples paquetes, repitiendo el proceso en 100 iteraciones con el objetivo de obtener resultados estadísticamente significativos. Se calcularon EL BER comparando los bits transmitidos y recibidos, y se generaron las curvas BER vs SNR. A partir de estas curvas se identificó el umbral de SNR a partir del cual la BER se reduce a niveles que permiten una calidad diagnóstica aceptable, tal como también se ha reportado en investigaciones recientes sobre transmisión de señales biomédicas sin codificación FEC [4] [11].

Los resultados se confrontaron con estándares y estudios previos sobre QoS en telemedicina. Esto incluyó condiciones recomendadas por 3GPP/ITU (latencia < 250 ms, BER baja), y evaluaciones similares en LTE para paquetes de datos médicos [12].

### 3. Análisis de requerimientos técnicos y de calidad de servicio en la transmisión de señales biomédicas

En primer lugar, se analizaron los parámetros de QoS que hacen referencia a la capacidad de una red para garantizar niveles de rendimiento específicos en la transmisión de datos [6]. En telemedicina, los parámetros críticos de QoS incluyen:

- Ancho de banda: Tasa promedio de datos transmitidos con éxito. En aplicaciones en tiempo real, se reserva ancho de banda garantizado para tráfico prioritario (como video o voz), siendo esenciales capacidades diferenciadas y gestión por políticas QoS [13].

- Retardo (latencia): tiempo total que tarda un paquete en viajar desde el emisor hasta el receptor; para aplicaciones de teleconsulta en tiempo real se recomienda mantenerla por debajo de 250 ms [6] [8].

- Jitter: variación del retardo entre paquetes consecutivos; un valor inferior a 30 ms es esencial para evitar interrupciones en el audio o video clínico [13] [9].

- Pérdida de paquetes: se refiere al porcentaje de paquetes que no llegan a su destino. En transmisiones médicas críticas debe mantenerse por debajo del 1 %, e idealmente bajo 0.01 % [10].

- Tasa de Error de Bit: proporción de bits recibidos erróneamente respecto al total transmitido. Un BER inferior a  $10^{-3}$  o  $10^{-4}$  es necesario para garantizar la

fidelidad de señales clínicas, como el ECG o imágenes de TAC [8] [9].

Estos parámetros de la red deben estar relacionados a cada tipo de datos de señales biomédicas a ser transmitidos como por ejemplo: Rayos X, TAC, EEG, ECG entre otros. Además, se debe incluir datos para una videoconferencia, lo que representa características y requerimientos de red particulares, lo que garantizará un telediagnóstico en tiempo real fiable, como se indica a continuación.

La configuración adecuada de estos parámetros depende del tipo de señal médica transmitida en los cuales de abarcaron estas señales:

#### 3.1. Radiografía Digital

La teleradiología es la práctica de enviar imágenes diagnósticas como radiografías o estudios de tomografía desde un sitio de adquisición a uno de interpretación clínica, mediante redes de telecomunicaciones. Esto permite realizar diagnósticos a distancia tanto en tiempo real como en modalidad diferida, cumpliendo con criterios de interoperabilidad y calidad diagnóstica [11].

##### 1. Parámetros de transmisión:

Frecuencia mínima de transmisión por el canal: Ancho de banda mínimo de 5 MHz para transportar imágenes DICOM sin comprimir [12].

Velocidad de transmisión: Tasas de 10–15 Mbps para radiografías (10–30 MB) y 20–50 Mbps para estudios de TAC (600 MB – 1GB) [13].

BER objetivo: Bit Error Rate posterior a FEC de  $< 10^{-4}$  para garantizar la integridad de las imágenes médicas [14].

Ancho de banda mínimo: De 5 MHz como base para radiografías; hasta 20 MHz en teleradiología de alta resolución [12].

##### 2. Parámetros de la QoS a medir

throughput efectivo (bits útiles/s), latencia: < 150 ms, jitter: < 30 ms, pérdida de paquetes:  $< 10^{-6}$ , relación Señal/Ruido (Signal to Noise Ratio, SNR): > 30 dB [15].

##### 3. Técnica de corrección de errores.

Se recomienda la aplicación de códigos Reed–Solomon o comprobación de paridad de baja densidad (Low-Density Parity Check, LDPC), los cuales se aproximan al límite de Shannon, permitiendo una tasa de errores aceptablemente baja incluso en canales con atenuación o interferencias [14] [16].

##### 4. Técnica de multiplexación.

Para garantizar la eficiencia del canal, se puede utilizar multiplexación por división de frecuencia (frequency division multiplexing, FDM) en redes de fibra o microondas, así como multiplexación por división de tiempo (time division multiplexing, TDM) en enlaces digitales dedicados [16].

##### 5. Tipo de conexión recomendado.

Fibra óptica: alta capacidad, baja atenuación y latencia mínima, cobre acondicionado (DSL, cable): alternativa urbana, satélite/microondas: opción en zonas remotas, con mayor latencia [13].

#### 6. Protocolo estándar

DICOM (ISO 12052:2017) sobre TCP/IP (puertos 104/2762) con TLS para cifrado y autenticación de transporte, se utilizan comúnmente para esta función en entornos clínicos [17].

### 3.2. Tomografía Computarizada

Consiste en la adquisición de imágenes volumétricas en un centro médico y su transmisión remota hacia un radiólogo. Esta transferencia se realiza utilizando el estándar DICOM, lo cual garantiza la interoperabilidad entre dispositivos y la fidelidad diagnóstica durante la visualización remota de cortes seccionales [18].

#### 1. Parámetros de transmisión:

Frecuencia mínima de transmisión por el canal: Se requieren al menos 20 MHz de ancho de banda para transportar un estudio de TAC completo sin compresión en tiempos clínicamente aceptables [19].

Velocidad de transmisión: Estudios TAC de entre 600 MB y 1 GB deben ser transmitidos a tasas de entre 20 y 50 Mbps para evitar retrasos clínicos [20].

BER objetivo: tras aplicar técnicas de corrección directa de errores FEC, debe ser inferior a  $10^{-4}$  para evitar artefactos en el volumen de imagen reconstruido [21].

Ancho de banda mínimo: Acorde a la velocidad de transmisión, se requieren enlaces con capacidad efectiva de 20 a 50 Mbps, considerando overhead de control y protocolos [20].

#### 2. Parámetros de la QoS a medir

Throughput efectivo (bits útiles/s), latencia: < 200 ms para el inicio de la visualización de cortes secuenciales, jitter: < 30 ms entre paquetes de imagen, pérdida de paquetes:  $10^{-6}$  para evitar huecos en el volumen reconstruido, SNR: > 30 dB para conservar contraste y nivel de detalle clínico [22].

#### 3. Técnica de corrección de errores.

Se utilizan principalmente Reed–Solomon y LDPC, que reducen el BER a valores cercanos a  $< 10^{-12}$  en canales con ruido y atenuación característicos de redes de área amplia [21] [23].

#### 4. Técnica de multiplexación

Se utilizan métodos como FDM en microondas o fibra óptica para dividir sub-bandas de frecuencia, así como TDM en enlaces digitales dedicados, que asignan ranuras de tiempo específicas para flujos de imagen TAC [23].

#### 5. Tipo de conexión recomendado.

Fibra óptica: por su capacidad, baja latencia y mínima atenuación, Cobre acondicionado (xDSL, cable): opción en zonas urbanas con infraestructura existente [20].

#### 6. Protocolo estándar

El intercambio de volúmenes TAC se realiza mediante DICOM (ISO 12052:2017) sobre TCP/IP, asegurado con TLS según los perfiles de seguridad DICOM para cifrado y autenticación de transporte [19] [24].

### 3.3. Electroencefalograma

#### 1. Parámetros de transmisión:

En Tele-EEG, se registran señales electroencefalográficas en un centro y se transmiten a distancia para su interpretación diagnóstica, manteniendo los mismos requisitos de calidad que un EEG presencial [25].

Frecuencia mínima de transmisión por el canal: La señal EEG debe ser muestreada al menos a 256 Hz para evitar aliasing, aunque es recomendable una frecuencia de 512 Hz, con filtros entre 0.5 Hz y 70 Hz para preservar el contenido relevante de frecuencia [25].

Velocidad de transmisión: Cada canal a  $256 \text{ Hz} \times 16 \text{ bits} = 4096 \text{ bps}$ ; para un sistema de 21 canales = 86 kbps. Sistemas WBAN operan típicamente a 250 kbps por nodo, lo que cubre holgadamente esta necesidad [26].

BER objetivo: Tras aplicar FEC (por ejemplo Turbo o Reed–Solomon), se busca un  $\text{BER} < 10^{-3}$  para asegurar integridad de la señal [27].

Ancho de banda mínimo: Al menos igual a la tasa de bits (100 kHz de ancho de banda de canal) para acomodar los = 86 kbps de datos y algo de overhead [25].

#### 2. Parámetros de calidad (QoS) a medir

Throughput efectivo (bits útiles/s), latencia: < 200 ms, pérdida de paquetes: <  $10^{-6}$ , SNR: > 30 dB, siguiendo la taxonomía de KPIs para e-salud [28].

#### 3. Técnica de corrección de errores.

Se aplican códigos Turbo ( $R=1/3$ ) y LDPC, que pueden reducir el BER a  $< 10^{-6}$  en canales con ruido AWGN, validado en transmisiones de EEG simuladas [27].

#### 4. Técnica de multiplexación

FDM para asignar sub-canales a flujos EEG simultáneos, o TDM en redes dedicadas, como describen los principios de multiplexación en telemedicina [29].

#### 5. Tipo de conexión recomendado.

Fibra óptica, cobre acondicionado (xDSL, cable): alternativa urbana, cobre acondicionado (xDSL, cable): para zonas remotas, aunque con latencias > 500 ms aunque no óptimo para aplicaciones críticas [26].

#### 6. Protocolo estándar

Formato de intercambio EDF/EDF-plus (European Data Format) sobre TCP/IP seguro (TLS), recomendado por ACNS para compatibilidad y confidencialidad. [25].

### 3.4. Electrocardiograma

#### 1. Parámetros de transmisión:

La transmisión remota de señales ECG adquiridas en un punto de atención a un centro de interpretación, garantizando la calidad diagnóstica mediante estándares de interoperabilidad y seguridad. Se basa en dispositivos portátiles que digitalizan la señal, la transmiten inalámbricamente al móvil del paciente y luego a un servidor clínico para su análisis [30].

Frecuencia mínima de transmisión por el canal: Frecuencia de muestreo recomendada:  $> 1000$  Hz para preservar buena resolución (hasta 100 Hz de contenido útil) [30] [31].

Velocidad de transmisión: Para un ECG de 12 derivaciones con resolución de 12 bits por muestra, la tasa de datos es: 12 derivaciones  $\times$  1000 Hz  $\times$  12 bits = 144 kbps. En la práctica, protocolos seriales de 115 kbps han demostrado ser suficientes para transmitir la señal. [30] [31].

BER objetivo: Tras aplicar FEC y retransmisiones selectivas, el BER debe mantenerse por debajo de  $10^{-3}$  para evitar artefactos clínicos [32].

Ancho de banda mínimo: El canal debe soportar al menos unos 150 kHz ( tasa de datos más overhead) [31].

#### 2. Parámetros de la QoS a medir

Las métricas críticas a medir son:

Throughput efectivo (bits útiles/s), latencia:  $< 250$  ms para interactividad clínica, jitter:  $< 30$  ms, pérdida de paquetes:  $10^{-6}$ , SNR:  $> 30$  dB [30] [32].

#### 3. Técnica de corrección de errores.

Se utiliza un esquema híbrido FEC junto a solicitud de repetición automática (Automatic Repeat Request, ARQ),

combinando códigos de bloque (p. ej., Reed–Solomon) con retransmisiones selectivas para alcanzar el BER requerido [32].

#### 4. Técnica de multiplexación

En el dominio digital, se emplea principalmente TDM para intercalar ranuras de tiempo entre múltiples flujos de ECG u otras señales biomédicas [31].

#### 5. Tipo de conexión recomendado.

Bluetooth para el enlace local entre sensor y móvil Android, garantizando portabilidad y bajo consumo.

Red móvil con edge computing (5G o LTE) o banda ancha fija para la transmisión remota [30].

#### 6. Protocolo estándar

HL7 aECG como formato XML interoperable y aprobado por FDA [33]. SCP-ECG como alternativa open-source para almacenamiento local [34].

DICOM-ECG, completo para integración PACS, aunque menos común en móviles [35].

### 3.5. Videoconferencia Médica

La videoconferencia médica permite consultas clínicas en tiempo real a través de enlaces bidireccionales de audio y video [36]

#### 1. Parámetros de transmisión:

La videoconferencia en telemedicina consiste en el uso de videollamadas bidireccionales en tiempo real para proporcionar servicios clínicos (consultas, terapias, segundas opiniones) donde el paciente y el proveedor no comparten ubicación física [37].

Resolución SD (480p) requiere enlaces de 0,3 Mbps, mientras que HD (720–1080p) necesita entre 2–8 Mbps en sistemas clínicos dedicados [38].

Velocidad de transmisión: Conexiones de 1–2 Mbps de descarga y 0,75–1,4 Mbps de subida soportan consultas individuales de calidad [38].

Después de aplicar técnicas FEC, se debe mantener un BER  $< 10^{-4}$  para garantizar integridad audiovisual [39].

Se recomienda un ancho de banda mínimo de 4 Mbps (uso individual) y hasta 10 Mbps en entornos hospitalarios pequeños [38].

#### 2. Parámetros de la QoS a medir

Las métricas críticas a medir son:

Throughput efectivo y SNR  $> 30$  dB para preservar calidad de señal, latencia  $< 150$  ms para evitar eco y retardo perceptible, jitter:  $< 30$  ms para mantener fluidez de audio/vídeo, pérdida de paquetes:  $< 10^{-6}$  para no interrumpir la llamada [38] [40].

#### 3. Técnica de corrección de errores.

Se utilizan códigos de bloque como Reed–Solomon o LDGM/LDPC a nivel aplicación, integrados en el flujo RTP, para recuperar paquetes perdidos sin retransmisión [39].

#### 4. Técnica de multiplexación

Se utiliza TDM sobre IP para asignar ranuras a audio y video, así como FDM en redes propietarias que usan H.323 para subcanales separados [41].

#### 5. Tipo de conexión recomendado.

Fibra óptica: prioridad por baja latencia ( $< 5$  ms/km) y gran capacidad. DSL/Cable: alternativa urbana con 10–50 Mbps. 4G/5G móvil: viable en campo, latencias  $\approx 50$  ms. Satélite: último recurso, latencias  $> 500$  ms [42].

#### 6. Protocolo estándar

Las videollamadas en telemedicina utilizan H.323 o SIP con códecs H.264/VP8 sobre RTP/UDP, cifrado con TLS/SRTP, conforme a las guías oficiales de la American Telemedicine Association (ATA) [43].

En segundo lugar, se analizó el uso de tecnologías de comunicación para soporte de telemedicina en Ecuador, en el cual se analizaron las siguientes tecnologías para poder dar solución a la elección para el canal de transmisión adecuado:

Segunda generación de comunicaciones móviles (Global System for Mobile Communications, GSM), utilizada para voz y SMS, con datos limitados vía GPRS/EDGE. En telemedicina, permite el envío de parámetros simples en emergencias o monitoreo rural [44]. En Ecuador, la cobertura 2G sigue activa, atendiendo zonas rurales, aunque resulta insuficiente para servicios modernos como videollamadas [45].

En cuanto al alcance, cuenta con cobertura nacional, incluyendo zonas rurales en Ecuador [46].

El soporte de una infraestructura 2G heredada por CNT, Claro y Movistar aún está activa, aunque limitada a voz y datos básicos [46].

El estado es activo como respaldo, pero totalmente obsoleto para aplicaciones avanzadas y no viable para videoconferencia en tiempo real, por lo que la implementación en Ecuador no se usaría en telemedicina moderna.

LTE es tecnología de banda ancha móvil 4G que alcanza hasta 100 Mbps en descarga y ofrece baja latencia, permitiendo videoconferencias y transmisión de datos biomédicos en tiempo real [47].

En cuanto al alcance, cuenta con un alcance entre el 50% y el 76% de la población, aprox. [48].

Tiene un alcance típico de 1 a 10 km (urbano), hasta 100 km (rural con torres altas) [48].

El estado es activo, vigente y en fase de expansión, actualmente la más fiable y no está obsoleta, lo cual sí permite la transmisión de imágenes médicas y consultas médicas en vivo [47] [48].

Tecnología de Quinta Generación (Fifth Generation, 5G) es la quinta generación de redes móviles, con velocidades de hasta gigabits y latencia por debajo de 10 ms, diseñada para aplicaciones avanzadas como telecirugía remota [47] [48].

En cuanto al alcance, no está disponible comercialmente en Ecuador, se encuentra en pruebas en entidades públicas, ya que se necesitaría de nuevas estaciones base. Se podría utilizar en la telemedicina, pero no está accesible en este momento al público. Alcance típico de 0.1–2 km [48].

La tecnología de sexta generación (sixth generation, 6G) es una red en fase de investigación, proyectada para ofrecer velocidades en terabits y latencias ultrabajas. Aún no cuenta con especificación ni implementación comercial [49].

En cuanto al alcance, no está disponible comercialmente en Ecuador; no existen ni pruebas ni infraestructura viable para la telemedicina en el futuro.

Interoperabilidad mundial para el acceso por microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WIMAX) es un estándar de acceso inalámbrico fijo y móvil con alcance de hasta 50 km y velocidades de 30–70 Mbps, usado en proyectos de telemedicina rural antes de ser sustituido por LTE [50].

Se implementó temporalmente en áreas urbanas entre 2010 y 2015 en Ecuador; actualmente está en desuso, ya que la red ha sido retirada, sin mantenimiento ni soporte técnico actualmente, lo cual teóricamente no es posible para la videoconferencia en tiempo real [50].

La conectividad satelital mediante antenas VSAT usa satélites GEO o LEO para proveer cobertura en zonas sin infraestructura terrestre, con latencia más alta en GEO y más baja en LEO [50] [51].

En cuanto al alcance, tiene una cobertura nacional, incluyendo regiones remotas como Amazonía y Galápagos, lo cual sería un beneficio para la telemedicina; sin embargo, el costo monetario sería el que influiría en el desarrollo de un sistema de telemedicina con esta tecnología. Tiene un alcance típico de hasta 36.000 km (GEO) y 1200 km (LEO). [52].

La fibra óptica con velocidades de gigabits y latencia muy baja es ideal para imágenes médicas y videoconferencias 4K. En Ecuador, la red troncal supera los 73 200 km, con perspectivas de llegar a 105 500 km en 2025 y cubrir al 35 % de los hogares mediante FTTH. El alcance típico es de 100 km por tramo sin repetidor, ilimitado con infraestructura adecuada [53].

En la Tabla 2 se presenta una comparación técnica entre diversas tecnologías de transmisión disponibles en el contexto ecuatoriano. A partir de los criterios evaluados como cobertura, latencia, disponibilidad, costo y compatibilidad con servicios de telemedicina se determinó que la LTE 4G representa la alternativa más viable. Esta elección se fundamenta en su equilibrio entre ancho de banda suficiente, latencia moderada, amplia cobertura nacional (incluyendo zonas rurales) y el hecho de que es una infraestructura ya desplegada y en expansión activa.

Asimismo, se analizó el diagrama funcional del sistema de transmisión y recepción desarrollado para este estudio, representado en la Figura 1 Este diagrama modela el flujo completo de datos biomédicos y videoconferencia, desde su adquisición en el punto de origen hasta su reconstrucción final tras atravesar un canal ruidoso, permitiendo evaluar su integridad y desempeño bajo condiciones reales.

## 4. Modelado y Simulación de Transmisión de Señales Médicas

En primer lugar, se analizó y se configuró la simulación del sistema LTE 4G para transmisión de señales biomédicas y multimedia.

Para la evaluación de transmisión de información biomédica y video multimedia, se desarrolló en este caso una simulación integral que permitió la observación de degradación de información transmitida bajo condición de canal con ruido AWGN y en este caso se simuló sin técnicas de corrección de errores.

A continuación, en la simulación se comenzó generando señales biomédicas (ECG, EEG) para simular condiciones reales, cada una con una duración de 10 segundos y una frecuencia de 500 Hz. Se generó como la superposición de ondas gamma, alfa y beta; se utilizaron sinusoides correspondientes a cada señal, las cuales fueron previamente almacenadas en archivo .mat, en este caso, un ruido para hacer lo más semejante a la actividad cerebral real. Esta señal fue normalizada y guardada para su posterior transmisión.

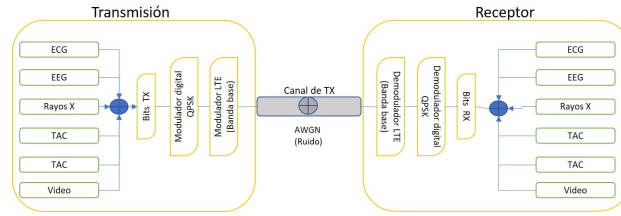


Figura 1. Diagrama de bloques de transmisión y recepción LTE con canal AWGN.

Además, se importaron en este caso dos imágenes médicas, TAC y rayos X, que se obtuvieron de un conjunto de datos públicos empleados en una investigación media (conjunto de datos de resonancia magnética de tumores cerebrales). Para la transmisión de videoconferencia, se utilizó un archivo MP4 real. En este caso se extrajeron un máximo de 50 cuadros para la reproducción recibida; cada píxel fue codificado en formato binario y cada cuadro se almacenó como una secuencia binaria.

Luego, se convirtieron las señales a formato binario; cada señal (ECG, EEG), imagen (TAC, Rayos X) y videoconferencia fue convertida a una secuencia de bits, finalmente todos los bits fueron concatenados en un vector unificado txBits.

Posteriormente, se imprimió en consola para poder visualizar los tamaños de bits enviados de cada señal y los bits totales enviados.

A continuación, se utilizó lteRMCDL de MATLAB para generar una configuración de referencia R.7 (Release 8 de LTE), que corresponde a un canal de 10 MHz y una sola antena de transmisión, con 100 subtramas simuladas, para una simulación de condiciones reales de transmisión, se definió un rango de SNR desde 0 hasta 10 dB con incrementos de 0.5 dB. Para cada valor de SNR, se evaluó el BER.

Luego, se configuró un canal con perfil de retardo con un repetidor de una sola antena. Este canal simuló condiciones de propagación realistas sin aplicar desvanecimiento complejo.

Seguidamente, se generó la configuración LTE con una modulación QPSK sobre los bits de entrada, obteniendo símbolos complejos.

Se verificó que los símbolos modulados coincidieran con la capacidad de LTE. Si el número de símbolos era menor, se rellenó con ceros, si era mayor, se truncó. Los símbolos se reorganizaron en una rejilla para su posterior transmisión.

Más adelante, se aplicó modulación OFDM con lteOFDMModulate, la señal modulada se transmitió por un canal AWGN, se realizó la demodulación OFDM la cual también se obtuvo el diagrama de constelación QSPK en este caso con  $SNR=N$  ( $N$  representando un número dado según la teoría aplicada), se compararon los bits originales y recibidos para calcular el BER.

Se calculó la reconstrucción de las señales recibidas

con un  $N$  de SNR, a continuación, se desempaquetó los bits recibidos que se separaron en bloques originales, luego se reconstruyeron las señales e imágenes, a las cuales se añadió una verificación binaria que comparó bit a bit los datos enviados y recibidos. Se generó una ventana gráfica que mostraba en tiempo real los cuadros del video recibidos.

Finalmente, se graficó la curva BER vs SNR en escala semilogarítmica, en esta gráfica se permitió la evaluación del desempeño del sistema LTE en presencia de ruido AWGN, sin aplicar codificación turbo, lo que sirvió como líneas de base.

## 5. Resultados

En función del análisis, se realizó una comparación de la evaluación de los parámetros de calidad de servicio, como se resume en la tabla 1 comparativa.

En la Figura 1 se realizó una comparación de distintas tecnologías de comunicación actualmente disponibles o evaluadas en Ecuador, como se resume en la tabla 2. La comparativa se ve reflejada en la elección más adecuada para la transmisión del canal, lo cual sería el más factible LTE (4G).

La simulación permitió identificar dos puntos críticos en la curva BER vs. SNR. En el primer umbral se registró un SNR de 7.8 dB, con un BER aproximado de  $10^{-3}$ . El segundo umbral relevante se ubicó en 9.5 dB, donde la BER se redujo hasta  $10^{-4}$ . Estas métricas resultaron fundamentales para evaluar la viabilidad de transmisión de señales biomédicas sobre redes LTE sin técnicas de corrección de errores. en la Figura 2.

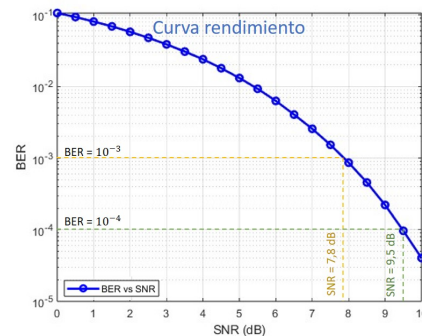


Figura 2. Curva de rendimiento del sistema LTE 4G

Característica	Rayos X	TAC	EEG	ECG	Videoconferencia
BW [12] [19] [25] [30] [31] [38]	5 MHz	20 MHz	250 Hz	1000Hz	2.4 GHz
Vtx [13] [20] [26] [30] [31] [38]	15Mbps	600Mbps	4096 bps	144 Kbps	2Mbps(Subida) - 0.75Mbps (Bajada)
BER [21] [23] [27] [31] [32]	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$
Throughput [21] [28] [31] [38]	bits útiles/s	bits útiles/s	bits útiles/s	bits útiles/s	bits útiles/s
Latencia [15] [22] [28] [30] [40]	< 150 ms	< 200 ms	< 200 ms	< 250 ms	< 150 ms
Jitter [15] [22] [28] [30] [38]	< 30 ms	< 30 ms	< 30 ms	< 30 ms	< 30 ms
SNR [28] [32] [41] [42]	30 db	30 db	30 db	30 db	30 db

**Tabla 1.** Tabla características biomédicas

Tecnología	Alcance típico (km)	Estado en Ecuador	Costo estimado	Aplicabilidad
GSM [44] [45] [46]	100 km	Obsoleta	Costo elevado	No recomendable
4G LTE [47] [48]	1 a 10 km (urbano), hasta 100 km (rural con torres altas)	Vigente	Más accesible	Recomendado
5G [48] [49]	0.1-2 km	En prueba piloto	No comercial aún a	Aún no disponible.
6G [49]	no está disponible comercialmente en Ecuador	En desarrollo	No disponible	Aún no disponible.
WIMAX [50]	5-16 km (móvil), hasta 50 km (fijo)	Obsoleto	Costo elevado por equipos	Sólo si no hay alternativa
Satélite [51] [52]	hasta 36.000 km (GEO) y 1200 km (LEO).	Usado en zonas remotas	Costo elevado	Alternativa viable pero el costo elevado
Fibra óptica [53]	100 km sin repetidores, ilimitados con repetidores.	En crecimiento rápido	Costo elevado	No Viable costo elevado

**Tabla 2.** Tabla comparativa de las tecnologías

Se transmitió la señal a 7.8 dB, a este nivel de SNR, se realizaron transmisiones de distintas señales para observar el impacto del canal ruidoso.

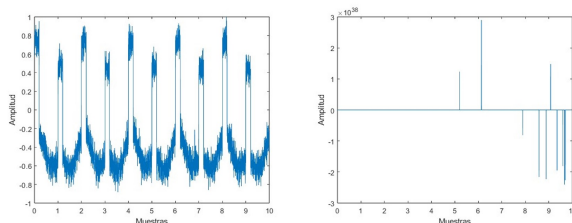
Lo cual primero se analizó, así dando los siguientes resultados:

La Figura 3 muestra la comparación entre la señal ECG original y la señal reconstruida luego de ser transmitida a través del sistema LTE. En la señal recibida se evidenció una distorsión notable, especialmente en la forma de onda. Se presenta la comparación visual entre la señal ECG original (lado izquierdo) y la señal reconstruida luego de ser transmitida a través del sistema LTE (lado derecho).

Lado izquierdo (señal original): La señal ECG original muestra las características típicas de un electrocardiograma limpio y bien definido. Esta señal sirve como referencia para evaluar la calidad de la transmisión.

Lado derecho (señal reconstruida): La señal recibida después de la transmisión presenta una distorsión visible debido a la influencia del canal LTE con ruido AWGN. Aunque la forma general de la señal ECG se conserva, se evidencia un leve ruido superpuesto y cierta pérdida de definición en los picos característicos. Esto se traduce en un efecto de suavizado y posible disminución en la nitidez de las ondas. Hasta degradación puede afectar la interpretación clínica si no se mitiga mediante técnicas de corrección o filtrado adicionales.

En conclusión, la comparación gráfica demuestra que, si bien la transmisión LTE permite conservar la estructura general de la señal ECG, la calidad recibida se ve afectada por el ruido y la distorsión inherente al canal, lo que resalta la necesidad de evaluar cuantitativamente esta pérdida y proponer mecanismos de mejora para aplicaciones críticas en telemedicina.



**Figura 3.** Señales ECG: original(izquierda) y recibida (derecha)

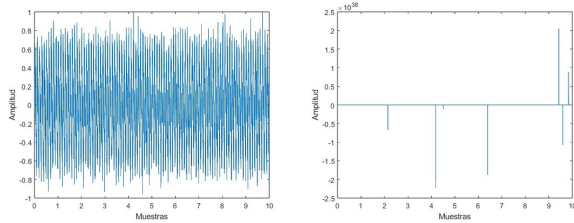
En segundo lugar, en la Figura 4 presenta la comparación entre la señal EEG original (lado izquierdo) y la señal reconstruida luego de ser transmitida a través del sistema LTE con canal AWGN (lado derecho).

Lado izquierdo (Señal Original): La señal EEG original exhibe una alta complejidad y variabilidad, con múltiples componentes de baja amplitud y alta frecuencia, características propias de la actividad cerebral. La forma de onda es continua, con transiciones suaves entre ciclos, lo que permite identificar patrones neurológicos relevantes como ondas alfa, beta o theta.

Lado derecho (Señal Reconstruida): En la señal recibida se observa una degradación más severa comparada con el caso del ECG. La complejidad de la señal EEG la hace más susceptible al ruido introducido por el canal. Se evidencian distorsiones en la forma de onda, presencia de ruido granular y pérdida de definición en las oscilaciones finas. Este deterioro afecta tanto la amplitud como la morfología de las señales, dificultando la identificación precisa de los patrones neurológicos.

Este resultado resalta un aspecto crítico: las señales EEG, por su mayor sensibilidad al ruido, requieren esquemas de protección más robustos o codificación adicional si se pretende transmitirlos en entornos inalámbricos ruidosos como LTE. La diferencia entre ambas señales refleja la importancia de considerar el tipo

de señal biomédica al diseñar sistemas de telemedicina.



**Figura 4.** Señales EEG: original(izquierda) y recibida (derecha)

Posteriormente, en la Figura 5 muestra la imagen médica tipo TAC original (lado izquierdo) frente a su versión reconstruida tras la transmisión por el sistema LTE bajo un canal AWGN (lado derecho).

Lado izquierdo (Imagen Original): La imagen TAC original posee un alto nivel de detalle estructural, con contornos nítidos y contrastes bien definidos entre las diferentes regiones anatómicas. Esto permite una visualización clara de los tejidos blandos, áreas cerebrales y posibles anomalías, facilitando un diagnóstico preciso.

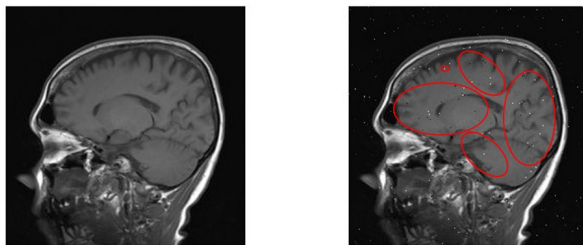
Lado derecho (Imagen Reconstruida): La imagen reconstruida presenta una pérdida visible de calidad. Se observan efectos de suavizado y pixelado, acompañados de ruido granular distribuido sobre la imagen. La definición de bordes y detalles finos se ve reducida, lo cual podría afectar la identificación de pequeñas lesiones o estructuras críticas. Aunque la imagen sigue siendo interpretable en términos generales, su degradación plantea riesgos si se requiere un análisis clínico detallado.

Este deterioro evidencia la importancia de aplicar métricas objetivas de calidad, tales como:

Error Cuadrático Medio (Mean Square Error, MSE): para evaluar la pérdida de información pixel a pixel.

Índice de Similitud Estructural (Structural Similarity Index, SSIM): para medir la similitud visual percibida por un observador humano.

Estos indicadores son fundamentales para validar si la calidad de imagen resultante es aceptable en un entorno de telemedicina, especialmente cuando la precisión diagnóstica es crítica.



**Figura 5.** Imágenes de rayos X: original(izquierda) y recibida (derecha)

A continuación, la Figura 6 presenta la imagen de Rayos X original (lado izquierdo) junto a su versión reconstruida luego de ser transmitida por el sistema LTE con canal AWGN (lado derecho).

Lado izquierdo (Imagen Original): La imagen de Rayos X original muestra un alto nivel de contraste y definición entre las diferentes densidades óseas y tejidos blandos.

Las estructuras óseas están claramente delimitadas y la visibilidad de detalles finos permite un diagnóstico radiológico preciso, como la identificación de fracturas, anomalías o lesiones sutiles.

Lado derecho (Imagen Reconstruida): La imagen reconstruida tras la transmisión muestra una pérdida evidente de calidad visual. Se manifiestan artefactos como ruido aleatorio, bordes suavizados y una disminución del contraste, afectando la percepción de estructuras pequeñas.

Esta degradación puede comprometer la capacidad de detección de lesiones menores o cambios óseos sutiles, lo que representa una limitación para aplicaciones clínicas críticas.

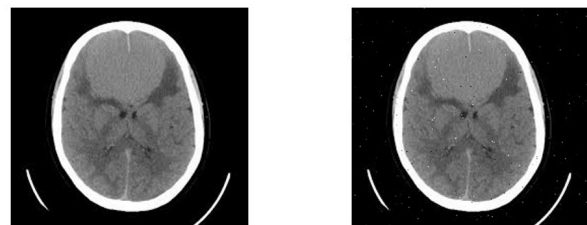
La comparación resalta la necesidad de emplear evaluaciones objetivas mediante métricas como:

PSNR: para medir la relación entre el nivel máximo de señal y el ruido.

SSIM: para cuantificar la pérdida de estructura y similitud visual.

MSE: para estimar la diferencia promedio entre la imagen original y la reconstruida.

Estos resultados reflejan que, aunque la transmisión de imágenes médicas por LTE es viable, la calidad puede no ser suficiente para ciertas aplicaciones diagnósticas sin técnicas adicionales de compresión eficiente o protección contra errores.



**Figura 6.** Imágenes TAC: original(izquierda) y recibida (derecha)

Los resultados obtenidos demuestran que, en este nivel de SNR, la calidad de la transmisión no cumple con los estándares necesarios, afectando así la precisión en la interpretación diagnóstica.

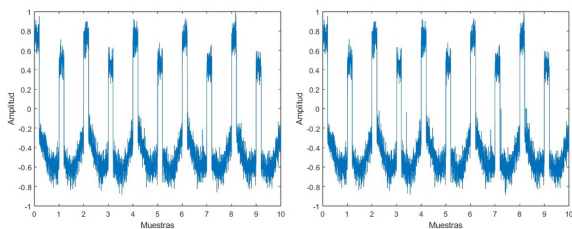
Luego, a partir del análisis inicial realizado Figura 2 a un SNR de 7.8 dB, en estas condiciones, se presentaron los resultados visuales obtenidos para cada señal transmitida.

Se procedió a evaluar nuevamente las señales biomédicas bajo un nivel de ruido menor, correspondiente a un SNR de 9.5 dB. En estas condiciones, se presentaron los resultados visuales obtenidos para cada señal transmitida:

Posteriormente, la Figura 7 muestra una comparación entre la señal ECG original (lado izquierdo) y la señal ECG recibida después de la transmisión a través del sistema LTE con canal AWGN (lado derecho).

Lado izquierdo (Señal Original): La señal ECG original presenta una morfología clara, con picos bien definidos correspondientes a las ondas fundamentales para el análisis clínico del ritmo cardíaco. La línea base es estable, sin ruido de fondo ni artefactos visibles, lo cual indica una adquisición limpia y apta para diagnóstico.

Lado derecho (Señal Recibida): La señal reconstruida tras la transmisión muestra que conserva la estructura general y es aún reconocible para fines clínicos, se aprecia una distorsión en la amplitud y un leve ruido superpuesto, lo que podría dificultar la interpretación si se requiere una alta precisión diagnóstica.

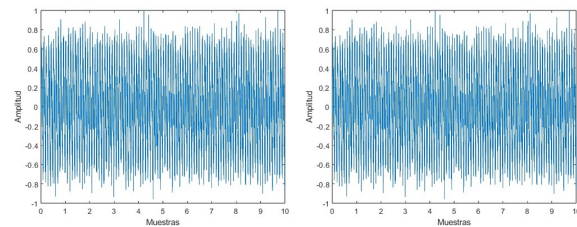


**Figura 7.** Señales ECG: original(izquierda) y recibida (derecha)

Más adelante, en la Figura 8 muestra la comparación entre la señal EEG original (lado izquierdo) y la señal reconstruida tras la transmisión mediante el sistema LTE con canal AWGN (lado derecho).

Lado izquierdo (Señal Original): La señal EEG original se caracteriza por su alta complejidad, bajo nivel de amplitud y variabilidad constante. La forma de onda presenta una dinámica rica en componentes de alta frecuencia, lo que permite identificar patrones neuronales característicos, como ondas alfa, beta, theta o delta, fundamentales para la evaluación de estados neurológicos o trastornos del sistema nervioso.

Lado derecho (Señal Recibida): Tras la transmisión, la señal EEG reconstruida evidencia una mayor susceptibilidad al ruido y reflejada la señal recuperada.

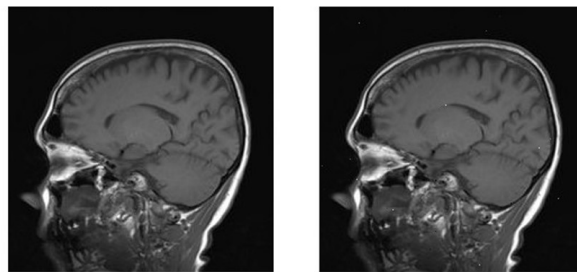


**Figura 8.** Señales EEG: original(izquierda) y recibida (derecha)

La Figura 9 muestra una comparación entre la imagen médica de Rayos X original (lado izquierdo) y la imagen reconstruida tras la transmisión a través del sistema LTE utilizando un canal AWGN (lado derecho).

Lado izquierdo (Imagen Original): La imagen original presenta una buena calidad radiológica, con contraste definido entre huesos, tejidos blandos y espacios pulmonares. Las estructuras óseas son claramente visibles, con bordes nítidos y detalles finos que permiten una adecuada evaluación diagnóstica, como la detección de fracturas, calcificaciones o alteraciones estructurales.

Lado derecho (Imagen Reconstruida): En la imagen reconstruida, se observan signos visuales más nítidos por el canal de transmisión. Lo cual dio como resultado la Figura 9 se aprecia una mejora en la claridad y calidad de la imagen recibida.

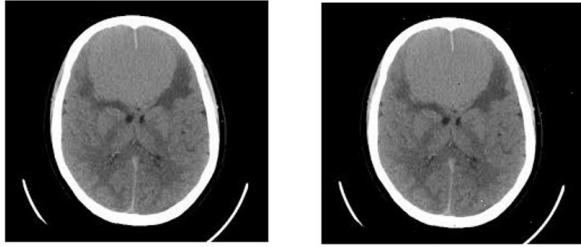


**Figura 9.** Imágenes de rayos X: original(izquierda) y recibida (derecha)

Seguidamente, en la Figura 10, muestra la comparación entre una imagen médica tipo TAC original (lado izquierdo) y su versión reconstruida tras la transmisión por el sistema LTE bajo condiciones de canal ruidoso (lado derecho).

Lado izquierdo (Imagen Original): La imagen TAC original posee una resolución diagnóstica alta, con contrastes definidos entre diferentes estructuras internas, como materia gris, blanca y posibles lesiones o masas. Los contornos anatómicos son nítidos, y los niveles de intensidad están bien distribuidos, lo cual permite realizar evaluaciones médicas detalladas y precisas.

Lado derecho (Imagen Reconstruida): La imagen TAC recibida tras la transmisión por LTE presenta una mejor resolución y detalle estructural.



**Figura 10.** Imágenes TAC: original(izquierda) y recibida (derecha)

Finalmente, la comparación de los resultados obtenidos en ambos escenarios permitió establecer de forma empírica que un SNR mínimo de 9.5 dB es necesario para garantizar una transmisión confiable de datos clínicos sensibles mediante LTE, sin la aplicación de técnicas de corrección de errores.

## 6. Discusión:

La simulación demostraron que la transmisión de señales biomédicas a través de LTE sin técnicas de corrección de errores puede mantener niveles aceptables de calidad diagnóstica, siempre que el SNR se mantenga en o por encima de los 9.5 dB. Este valor mínimo fue determinado de forma empírica a partir del análisis del BER y la reconstrucción visual de las señales transmitidas. Estos hallazgos respaldan estudios recientes que destacan la necesidad de condiciones mínimas de calidad de señal para la transmisión segura y confiable de datos clínicos en sistemas inalámbricos [1] [5] [6].

En particular, la señal ECG mostró una recuperación morfológica considerablemente más precisa al mejorar el SNR, lo cual es fundamental para su análisis clínico. Investigaciones como la de Spicher et [2] señalan que preservar la morfología de la señal es esencial para el diagnóstico de arritmias y otras patologías cardíacas. Del mismo modo, la señal EEG, al ser más sensible al ruido por su baja amplitud y estructura compleja, también evidenció una mejora significativa en su reconstrucción al aumentar la relación señal a ruido, lo cual concuerda con lo reportado J. Al-Jaroodi and N. Mohamed [3] y S. K. Kumar y B. R. Sujatha [25].

En lo que respecta a las imágenes médicas (rayos X y TAC), se logró preservar los detalles anatómicos más relevantes, como contornos y regiones internas, incluso sin aplicar técnicas FEC. Este resultado coincide con los aportes de Wang et al. [8], quienes destacan que mantener la resolución estructural en imágenes médicas es indispensable para su utilidad diagnóstica, especialmente en entornos de educación quirúrgica o

teleconsulta. Asimismo, estudios centrados en la transmisión de video médico confirman que la claridad visual y la latencia están directamente relacionadas con el control del SNR en redes móviles [9] [42].

Es importante destacar que esta simulación se desarrolló sin el uso de técnicas de corrección de errores (Turbo código), con el fin de evaluar el rendimiento base del sistema. Este enfoque, también adoptado en investigaciones como las de Wang et [21] y A. T. Haque et al. [32], permite establecer umbrales mínimos de calidad para luego introducir mejoras progresivas en trabajos futuros. La evidencia muestra que al integrar esquemas adaptativos como codificación cruzada en capas, es posible mejorar aún más la robustez y eficiencia de la transmisión [6], [27].

Por otra parte, los resultados adquieren relevancia adicional en contextos como zonas rurales o con limitada infraestructura digital, donde las redes LTE pueden representar la única vía disponible para ofrecer servicios de salud remota. Tal como lo expone el caso ecuatoriano presentado por Hispasat-Comitas [52] y el análisis de la red nacional por Osni [46], la calidad del servicio en estas regiones puede determinar el éxito o fracaso de una implementación de telemedicina. Bajo este escenario, garantizar una transmisión robusta con SNR adecuados resulta esencial.

## 7. Conclusion

El análisis integral de los resultados obtenidos confirmaron que la transmisión de señales biomédicas a través de LTE, bajo condiciones de SNR iguales o superiores a 9.5 dB y sin técnicas de corrección de errores, es viable para preservar la utilidad diagnóstica de los datos clínicos. La fidelidad en la reconstrucción de señales fisiológicas (ECG y EEG), así como de imágenes médicas y video, evidenció que LTE ofrece un equilibrio entre cobertura, ancho de banda y latencia, posicionándose como una alternativa técnica adecuada para escenarios de telemedicina, especialmente en regiones con infraestructura limitada. Además, la investigación permitió identificar puntos críticos de rendimiento del sistema LTE aplicado a salud, aportando una línea base clara sobre la cual pueden construirse futuras implementaciones más robustas que incluyan codificación de canal o técnicas de compresión adaptativa. En conjunto, este estudio contribuye al desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a la salud digital y refuerza la viabilidad del uso de redes móviles como soporte para la transmisión eficiente de información médica en tiempo real, especialmente en regiones con infraestructura limitada.

## Referencias

- [1] C. O. Alenoghena, (2023) “Telemedicine: A Survey of Telecommunication Technologies, Developments, and Challenges,” *J. Sens. Actuator Netw.*, vol. 12, no. 2.
- [2] N. Spicher et al., (2021) “Edge computing in 5G cellular networks for real-time analysis of electrocardiography recorded with wearable textile sensors,”.
- [3] J. Al-Jaroodi and N. Mohamed, (2021) “Scalable telehealth services to combat COVID-19: the role of mobile networks in transmitting biomedical data,” *Int. J. Telemed.*, vol. 9, no. 1
- [4] Y. Li, M. Zhou, and Y. Zhang, (2021) “QoS-Aware IoT Edge Network for Mobile Telemedicine Enabling Real-Time Diagnosis,” *Sensors*, vol. 21, no. 7.
- [5] L. Smital, (2020) “Real-Time Quality Assessment of Long-Term ECG Signals Recorded by Wearables,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 67, no. 5.
- [6] S. Hussein y A. Al-Jumaily (eds.), (2025) *Quality of Service (QoS) – Challenges and Solutions*.
- [7] M. A. Kiani y M. M. Hassan, (2024) “QoS-Aware Framework for Healthcare Data Transmission in Wireless Body Area Networks,” *Future Internet*, vol. 16, no. 2, p. 52.
- [8] Wang et al., (2021) *Joint Resource Allocation and Error Control for Wireless Telemedicine Services*, *IEEE Systems Journal*, vol. 15.
- [9] Li et al., (2021) *QoS-Aware IoT Edge Network for Mobile Telemedicine*, *Sensors*, vol. 21, no. 7.
- [10] MathWorks, (2023) *End-to-End LTE Simulation, LTE Toolbox Documentation*.
- [11] Kumar, Sujatha, (2024) *Turbo Decoding Performance Analysis for EEG Signal Processing in Telemedicine Applications*.
- [12] M. A. Kiani y M. M. Hassan, (2024) “QoS-Aware Framework for Healthcare Data Transmission in Wireless Body Area Networks,” *Future Internet*, vol. 16.
- [13] J. W. Adhikari, H. Han y J. Lv, (2024) “Optimizing Real-Time Video Transmission for Surgical Tele-Education,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 34.
- [14] S. A. Labiod, M. Gharbi, F.-X. Coudoux, P. Corlay y N. Doghmane, (2023) “Enhanced Adaptive Cross-layer Scheme for Low Latency HEVC Streaming Over Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs).
- [15] A. N. Chikh, B. A. Sabir, M. Sadik y L. Ladid, (2019) “Quality of Experience for Streaming Services: Measurements, Challenges and Insights,”.
- [16] G. Wang et al., (2022) “Efficient Low-Complexity LDPC Decoder for Real-Time Medical Video Transmission,” *IEEE Access*, vol. 10.
- [17] ISO/TC 215, (2017) “Health informatics — Digital Imaging and Communication in Medicine (DICOM) including workflow and data management,”.
- [18] S. Hussein y A. Al-Jumaily (eds.), (2025) *Quality of Service (QoS) – Challenges and Solutions*.
- [19] ISO/TC 215, (2017) “Health informatics — Digital Imaging and Communication in Medicine (DICOM) including workflow and data management,” *ISO 12052:2017*.
- [20] M. A. Kiani and M. M. Hassan, (2024) “QoS-Aware Framework for Healthcare Data Transmission in Wireless Body Area Networks,” *Future Internet*, vol. 16, no. 2, p. 52.
- [21] G. Wang et al., (2022) “Efficient Low-Complexity LDPC Decoder for Real-Time Medical Video Transmission,” *IEEE Access*, vol. 10.
- [22] J. W. Adhikari, H. Han and J. Lv, (2024) “Optimizing Real-Time Video Transmission for Surgical Tele-Education,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 34.
- [23] H. Wang, S. K. Sharma, T. Jiang y K. Zheng, (2021) “Joint Resource Allocation and Error Control for Wireless Telemedicine Services,” *IEEE Systems Journal*, vol. 15.
- [24] S. A. Labiod, M. Gharbi, F.-X. Coudoux, P. Corlay y N. Doghmane, (2023) “Enhanced Adaptive Cross-layer Scheme for Low Latency HEVC Streaming Over Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs)”.
- [25] S. K. Kumar y B. R. Sujatha, (2020) “Reliable Transmission of EEG Signal in Tele-Medicine,” *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 29.
- [26] L. R. and V. P., (2020) “Wireless Body Area Network (WBAN)-Based Telemedicine for Emergency Care,” *Sensors*, vol. 20.

- [27] S. Kumar K. B. and B. R. Sujatha, (2024) “Turbo Decoding Performance Analysis for EEG Signal Processing in Telemedicine Applications: A Comparative Study in 5G Networks”.
- [28] Vetrivelan P. and Latha R., (2023) “Toward QoS Monitoring in IoT Edge Devices Driven Healthcare,” *Sensors*, vol. 23, no. 21.
- [29] B. Olaniyi S. et al., (2024) “MAXIMIZING NETWORK CAPACITY, CONTROL AND MANAGEMENT IN DESIGNING A TELEMEDICINE NETWORK”.
- [30] N. Spicher, A. Klingenberg, V. Purrucker y T. M. Deserno, (2021) “Edge computing in 5G cellular networks for real-time analysis of electrocardiography recorded with wearable textile sensors”.
- [31] C. S. Hu et al., (2020) “BER Optimization Using FEC and ARQ for Wearable ECG Signal Transmission Over Wireless Body Area Networks,” *Sensors*, vol. 21.
- [32] A. T. Haque et al., (2022) “An mHealth ECG Monitoring System for Patient-Specific Arrhythmia Detection Using Cloud Computing”.
- [33] «HL7 aECG»,(2025) Wikipedia, actualizado recientemente, consulta HL7 aECG v3 (XML, FDA)
- [34] D. K. Sahoo, R. K. Tripathy y S. K. Mohapatra, (2021) “Secure Transmission of ECG Signals for Mobile Healthcare Using SCP-ECG Standard”.
- [35] H. Wang et al.,(2021) “DICOM-Based ECG Integration in PACS for Telecardiology Applications,” *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, vol. 11, no. 3, pp. 787–794.
- [36] C. Spicher, (2021) “Wearable textile sensors”.
- [37] M. Wootton, R. Bonnardot, y S. Liu, (2021) “Telemedicine Videoconferencing Bandwidth Requirements for Real-Time Clinical Services: A Review,” *J. Telemed. Telecare*, vol. 27.
- [38] S. Sirmayanti, A. Tain y N. K. Hamzidah, (2023) “Comparative Study of QoS on Video Meeting Tool Application in 4G LTE Network using Wire shark,” *SISTEMASI*, vol. 12, no. 1, pp. 105–115.
- [39] J. Jiménez, R. González y E. Ugarte, (2020) “Architecture and Protocol to Optimize Videoconferencing in Wireless Networks”.
- [40] I. Khan , (2024) “An Experimental Study of Low-Latency Video Streaming over 5G”.
- [41] Infrateq, (2021) “VC400 video conferencing system supports both H.323 and SIP protocols”.
- [42] P. Sookhai y R. De la Torre, (2023) “Performance of telehealth videoconferencing over 4G/5G and fixed broadband networks”.
- [43] American Telemedicine Association (ATA), (2021) “Practice Guidelines for Real-Time Video-Based Online Telemedicine”.
- [44] F. M. Silva , (2019) “Use of GSM networks for remote patient monitoring in emergency scenarios,” *Telemed. e-Health*, vol. 25.
- [45] Wikipedia, (2025) “Corporación Nacional de Telecomunicaciones”.
- [46] M. Osni,(2020) “Evaluación del estado de la red 2G/3G en Ecuador” *Revista Ecuatoriana de Telecomunicaciones*.
- [47] J. Al-Jaroodi and N. Mohamed,(2021) “Scalable telehealth services to combat COVID-19: the role of mobile networks in transmitting biomedical data,” *Int. J. Telemed.*
- [48] AtlantiK Systeme. (2021)“LTE and 5G connectivity in the healthcare sector.”
- [49] M. Giordani, M. Polese, A. Roy, D. Castor, y M. Zorzi,(2020) “A tutorial on 6G: Research directions and vision,” *Computer Networks*, vol. 167.
- [50] J. Alsina and N. Mohamed, (2021) “Telemedicine: A survey of telecommunication technologies,” *Internet of Things*, vol. 12, no. 2, art. 20
- [51] J. Alsina and N. Mohamed,(2021) “Telemedicine: A survey of telecommunication technologies,” *Internet of Things*, vol. 12, no. 2, art. 22.
- [52] Hispasat-Comitas, (2021) “Telemedicina vía satélite en zonas rurales de Ecuador,” caso de estudio.
- [53] C. U. Shah, (2023) “Brecha digital en Ecuador”