

Design and Validation of an Offline-First Electronic Health Record Architecture for Intermittent Connectivity Environments

José Sebastian Ospina Cañari¹; Eilyn Noemi del Aguila Castillo²; Luis Ricardo Hermoza Paz³

^{1,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u18300006@utp.edu.pe, lhermoza@utp.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u18309286@utp.edu.pe

Abstract— This paper presents the design, implementation, and validation of an offline-first electronic health record (EHR) architecture intended for healthcare environments with intermittent connectivity and limited technological infrastructure. The proposed system is centered on a locally deployed architecture based on a lightweight web application with a local server, enabling the registration, storage, and management of clinical information without permanent Internet access, while incorporating deferred synchronization mechanisms aligned with HL7/FHIR-compatible structures. The validation of this architecture was carried out through the development of a functional prototype, which was evaluated under multiple operational conditions including data integrity, security, access control, synchronization behavior, and performance under load, complemented by a Technology Acceptance Model (TAM)-based assessment involving 15 medical specialists to evaluate usability and adoption in real clinical contexts. Results obtained from the tested architecture demonstrate consistent data storage without record duplication, robust resistance to SQL injection attempts through parameterized queries, and reliable synchronization behavior without information loss in scenarios of intermittent connectivity, maintaining stable performance even under high-load conditions such as the registration of 1000 patients. Individual synchronization operations achieved an average latency of 5 ms, while bulk updates involving 1050 records required 91 s. The acceptance evaluation yielded mean scores above 4.0/5 across most items, highlighting its suitability for low-connectivity environments ($M=4.67$) and its potential as a complementary deployment model ($M=4.73$). It is concluded that the validated architecture is technically viable and operationally suitable for small and medium-sized healthcare facilities, offering a practical and resilient approach for environments with constrained connectivity and infrastructure.

Keywords— Electronic health records, Offline-first architecture, HL7/FHIR interoperability, Deferred synchronization, Intermittent connectivity

Diseño y validación de una arquitectura de historia clínica electrónica con enfoque offline-first para entornos con conectividad intermitente

José Sebastian Ospina Cañari¹; Eilyn Noemi del Aguila Castillo²; Luis Ricardo Hermoza Paz²

^{1,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u18300006@utp.edu.pe, lhermoza@utp.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u18309286@utp.edu.pe

Resumen— La digitalización de historias clínicas electrónicas (HCE) en establecimientos de salud con conectividad intermitente continúa siendo un desafío técnico y operativo. Este estudio presenta el diseño, implementación y validación de una arquitectura de HCE basada en un enfoque offline-first, orientada a entornos con infraestructura tecnológica limitada. La solución propuesta se centra en una arquitectura desplegada localmente mediante una aplicación web ligera con servidor local, que permite el registro, almacenamiento y gestión de información clínica sin dependencia permanente de Internet, incorporando además mecanismos de sincronización diferida compatibles con estructuras HL7/FHIR. La validación de esta arquitectura se realizó mediante el desarrollo de un prototipo funcional evaluado bajo múltiples condiciones operativas, incluyendo integridad de datos, seguridad, control de acceso, comportamiento de sincronización y rendimiento bajo carga, complementado con una evaluación de aceptación basada en el Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM) aplicada a 15 médicos especialistas para analizar su usabilidad y adopción en contextos reales. Los resultados evidenciaron almacenamiento consistente sin duplicación de registros, resistencia frente a intentos de inyección SQL mediante consultas parametrizadas y sincronización confiable sin pérdida de información en escenarios de conectividad intermitente, manteniendo un rendimiento estable incluso bajo condiciones de alta carga como el registro de 1000 pacientes. La sincronización individual presentó una latencia promedio de 5 ms, mientras que la actualización de 1050 registros requirió 91 s. La evaluación de aceptación mostró medias superiores a 4.0/5 en la mayoría de los ítems, destacando su adecuación a entornos de baja conectividad ($M=4.67$) y su potencial como modelo de implementación complementaria ($M=4.73$). Se concluye que la arquitectura validada es técnicamente viable y operativamente adecuada para establecimientos de salud pequeños y medianos, constituyendo una alternativa práctica y resiliente para contextos con limitaciones de conectividad e infraestructura.

Palabras Clave— Electronic health records, Offline-first architecture, HL7/FHIR interoperability, Deferred synchronization, Intermittent connectivity

I. INTRODUCCIÓN

Las Historias Clínicas Electrónicas (HCE) han pasado de ser una promesa tecnológica para convertirse en una pieza central para organizar la información en salud. Su importancia no solo se limita a la digitalización de los registros médicos, sino también radica en la posibilidad de realizar un seguimiento más claro de los pacientes, reducir errores clínicos y facilitar que los equipos clínicos trabajen con información completa y actualizada [1], [2], [3], [4].

Con ese objetivo, a nivel global se han impulsado estándares como HL7 y FHIR, diseñados para garantizar que distintos sistemas puedan compartir datos de manera confiable. Estos avances han permitido integrar equipos, mejorar análisis clínicos y conectar hospitales que antes trabajaban de manera aislada [5], [6], [7], [8].

Aun así, este progreso no ha sido uniforme. Muchos países, especialmente aquellos con brechas tecnológicas o zonas rurales amplias, han encontrado dificultades para sostener sistemas que dependen de buena conectividad, capacitación del personal o infraestructura constante [10], [11], [12], [13], [14].

América Latina atraviesa justamente este proceso: avanza en digitalización, pero todavía lidia con desigualdades en acceso a tecnología, cobertura de red y capacidad operativa del personal de salud [15], [16], [17].

Perú está siguiendo esa misma ruta. En los últimos años se han creado lineamientos técnicos y perfiles FHIR nacionales. En un marco normativo que incluye el Registro Nacional de Historias Clínicas Electrónicas (RENHICE), se busca estandarizar y regular la manera en que se comparte la información clínica en todo el país [18], [19], [20].

También se han desarrollado ejercicios prácticos de interoperabilidad, en los que distintos sistemas de HCE han demostrado su capacidad para intercambiar datos en entornos reales. Entre ellos destacan soluciones basadas en modelos de IA capaces de operar con datos clínicos estructurados mediante HL7 FHIR, sistemas abiertos y offline utilizados en la atención de más de 26 000 pacientes, y entornos hospitalarios que han integrado dispositivos médicos y registros clínicos para procesar información de más de 114 000 pacientes con intercambio estandarizado de datos [19], [20], [21].

Sin embargo, persisten retos que condicionan el despliegue efectivo de estas soluciones. Muchos establecimientos de salud, sobre todo fuera de los grandes centros urbanos, siguen enfrentando conectividad irregular, equipos limitados y dificultades para mantener sistemas complejos [22], [23], [24], [25], [26].

En este escenario, los sistemas de HCE de código abierto han adquirido un papel clave, especialmente en zonas rurales con restricciones operativas y tecnológicas. Su diseño técnico permite operar en condiciones donde la infraestructura es mínima. En lugar de depender estrictamente de servidores centralizados y conexiones permanentes, muchos de estos

sistemas se basan en arquitecturas modulares, bases de datos ligeras y mecanismos de sincronización diferida, lo que los convierte en una alternativa especialmente adecuada para entornos donde la digitalización de la salud enfrenta desafíos logísticos y de infraestructura.

A pesar de sus fortalezas, la implementación de estos sistemas no está exenta de desafíos. A nivel internacional, plataformas como GNU Health han demostrado que, aunque permite operación offline y sincronización diferida, requiere servidores locales relativamente robustos y personal capacitado para configurar sus módulos complejos, lo que puede limitar su uso en entornos muy remotos o con escasos recursos técnicos. De manera similar, OpenMRS y su extensión Bahmni ofrecen interoperabilidad avanzada y recolección de datos desde dispositivos clínicos, pero dependen de conectividad periódica y de soporte técnico constante para mantener sincronizados los servidores locales y centrales. Por su parte, OpenEMR, aunque extremadamente portátil y fácil de desplegar en entornos con pocos recursos, puede enfrentar dificultades de escalabilidad cuando se necesita gestionar grandes volúmenes de pacientes o integrarse con sistemas externos. Finalmente, FreeMED y otros sistemas ligeros son ideales para hardware antiguo y conexiones lentas; aun así, su funcionalidad limitada y la dependencia de soporte local pueden restringir la complejidad de los procesos clínicos que pueden registrar. En conjunto, estas plataformas evidencian un avance necesario y significativo hacia HCE resilientes, capaces de mantener la continuidad de la atención incluso en contextos con infraestructura mínima [27], [28], [29], [30].

A. Evaluación de los sistemas de HCE

La interoperabilidad y compatibilidad de los sistemas de HCE varían significativamente según el sistema utilizado. Por ejemplo, OpenEMR se alinea en un 73.81% con el estándar nacional HCEMDS, mientras que OpenClinic alcanza solo un 33.33%, lo que refleja diferencias importantes en la preparación para integrarse con marcos regulatorios establecidos. En cuanto a la adopción, en Ruanda, todos los hospitales distritales han implementado los sistemas de HCE, de los cuales el 83.3% utiliza OpenMRS. No obstante, en los centros de salud, la adopción es considerablemente menor, alcanzando solo un 33%. A pesar de estas diferencias, los proveedores de salud en general muestran una fuerte preferencia por los sistemas electrónicos, con un 86.8% de ellos prefiriendo los sistemas de HCE sobre los registros en papel, y un 95.6% reportando mejoras en la atención al paciente gracias a estos sistemas. Aun así, solo un 38.2% de los proveedores en Ruanda utiliza HCE de manera total, lo que refleja los desafíos en la transición hacia una digitalización completa. En Turquía, la adopción es más avanzada, con el 100% de los hospitales públicos implementando al menos funciones básicas de HCE y un 66.3% de estos hospitales utilizando funciones más extensas. Sin embargo, a pesar de estos avances, persisten obstáculos que dificultan la implementación plena de los HCE. Por ejemplo, en algunos países las barreras de infraestructura siguen siendo un problema; donde el 41.8% de los hospitales que aún no han adoptado HCE mencionan la falta de exposición o

entrenamiento inicial del personal como un factor limitante [31], [32], [33], [34], [35].

B. Calidad de datos en HCE

Los estudios sobre la calidad de los datos en los sistemas de HCE han mostrado resultados mixtos en cuanto a la completitud y precisión de la información. En Ruanda, tras analizar 3,467 expedientes clínicos y más de 194,000 puntos de datos, se encontró que la completitud de los registros superaba el 85% en la mayoría de los elementos, aunque se observaron deficiencias en áreas como la carga viral y los esquemas de tratamiento de segunda y tercera línea. La concordancia entre los registros en papel y electrónicos fue superior al 85% en valores no relacionados con fechas, pero las discrepancias fueron más marcadas en los registros de fechas. En cuanto a la calidad global, el puntaje de concordancia promedio fue de 10.2, con una desviación estándar de 1.28, lo que refleja un buen nivel de armonización en la mayoría de los datos. Además, la implementación de alertas clínicas en algunos centros de salud mostró mejoras significativas en la completitud y puntualidad del registro de carga viral y retiro de medicamentos, con incrementos entre el 11.9% y 32.6% [36].

Por otro lado, en el sistema mUzima-OpenMRS en Ruanda, se analizaron 231,799 registros, con una alta unicidad del 88.8%, lo que indica que la identificación de pacientes fue precisa y con baja incidencia de duplicados. La completitud de los datos obligatorios alcanzó un 81.1%, un resultado considerado alto en el contexto comunitario. No obstante, se identificaron áreas de mejora en la consistencia de los datos y en los controles internos de calidad, destacando la necesidad de reforzar la capacitación de los trabajadores de salud comunitarios (CHWs) para mejorar la precisión y evitar duplicados en los registros. Estos hallazgos refuerzan la importancia de la estabilidad técnica del sistema y el soporte continuo para mantener altos estándares de calidad en los datos [37].

C. Usabilidad y experiencia del usuario en HCE

En un estudio realizado en 112 hospitales de EE. UU., con más de 5,600 encuestas a usuarios de primera línea, se encontró que un mayor puntaje en usabilidad del HCE se correlacionaba positivamente con mejores resultados en seguridad, lo que indica que los sistemas más fáciles de usar también tienden a ser más seguros. En otro estudio con 191 enfermeras, se observó que una mayor incompatibilidad entre el HCE y las rutinas clínicas de las enfermeras incrementaba su agotamiento emocional. Por ejemplo, un mayor ajuste entre el sistema y las prácticas clínicas existentes se asoció con una disminución en el burnout. Además, un análisis realizado en 351 clínicas de EE. UU. sobre el impacto de la mala praxis encontró que, aunque la mayoría de los médicos no experimentaron cambios significativos en el tiempo dedicado a los HCE, los especialistas en áreas con mayor riesgo de mala praxis aumentaron su tiempo total dedicado a la documentación electrónica en 6 minutos al día y el tiempo dedicado a la documentación diaria en 2.77 minutos. Estos hallazgos subrayan que la experiencia de los usuarios con el HCE no solo depende de la facilidad de uso del sistema, sino también de cómo se adapta a las necesidades del

personal médico y a las exigencias legales y clínicas, lo que influye tanto en la carga de trabajo como en el bienestar emocional del personal [38], [39].

D. Educación y formación sobre HCE

La formación en el uso de los sistemas de HCE es esencial para maximizar su efectividad en la práctica clínica. Los estudios muestran que, en términos de rendimiento, la optimización de la arquitectura puede mejorar significativamente la eficiencia operativa. Por ejemplo, se reportó una reducción del 42%–47% en el tiempo de ejecución y una disminución del 16%–20% en el consumo de memoria después de implementar mejoras arquitectónicas en sistemas como OpenMRS y TeaStore. Esto implica que una correcta actualización y mantenimiento técnico tiene un impacto directo en la experiencia de los usuarios de HCE, facilitando un uso más eficiente del sistema. Además, el rendimiento de modelos como CodeT5 supera al de CodeBERT en precisión, lo que sugiere que sistemas con arquitecturas más complejas y bien optimizadas pueden ofrecer mejores resultados, aunque con un mayor consumo de recursos. Sin embargo, los beneficios del rendimiento tecnológico no siempre se traducen en un uso óptimo si los profesionales no reciben la formación adecuada. La falta de capacitación técnica puede conducir a errores en la introducción de datos y a una adopción incompleta de las funcionalidades del sistema, lo cual sigue siendo un desafío en la implementación de HCE a gran escala. Por ello, mejorar la capacitación y el acceso a programas educativos específicos para los usuarios puede optimizar tanto la experiencia del usuario como el rendimiento general del sistema HCE [40], [41].

E. Flujo de Trabajo de Enfermería y Uso de HCE en Entornos Clínicos

El impacto de los sistemas de HCE en el flujo de trabajo de enfermería varía significativamente según la unidad y la implementación. En un estudio sobre la conversión a un nuevo sistema HCE en atención preoperatoria, el tiempo total por caso se redujo de 68 minutos a 38 minutos, y el tiempo dedicado a las tareas relacionadas con el HCE pasó del 83% al 53%, permitiendo un aumento en la interacción directa con los pacientes del 17% al 47%. Además, la fragmentación de las tareas también disminuyó, mejorando la continuidad en la realización de evaluaciones de enfermería y listas de verificación preoperatorias. Por otro lado, en un análisis de unidades de cuidados críticos, se observó que el tiempo dedicado a la documentación variaba entre 78.5 y 88.4 minutos por enfermera, siendo los componentes más documentados los flowsheets y registros de administración de medicamentos (MAR). Sin embargo, la usabilidad de estos componentes fue baja, con flowsheets y care plan obteniendo puntuaciones de 62.13 y 46.88, respectivamente, lo que reflejó dificultades significativas en su uso. Más del 60% de las enfermeras calificaron estos componentes como pesados debido a la redundancia y falta de personalización. Para reducir la carga, muchas enfermeras recurrieron a estrategias como delegar tareas o usar funciones de "copiar-pegar". Estos hallazgos sugieren que mejorar la usabilidad y personalización del HCE, junto con una capacitación más específica, es clave para

optimizar el flujo de trabajo y mejorar la atención al paciente [42], [43].

F. Mejora de la Documentación Clínica y Uso de Herramientas Educativas

La capacitación adecuada en el uso de sistemas de HCE se asocia con mejoras significativas en la calidad de la documentación clínica. En un hospital universitario, la implementación de una herramienta educativa basada en un mnemotécnico estructurado para la documentación postoperatoria produjo incrementos sustanciales en indicadores clave, con aumentos que oscilaron aproximadamente entre 30% y 60% respecto a la línea basal. Por ejemplo, la identificación del paciente mejoró de menos del 20% a más del 75%, el registro del uso de antibióticos pasó de alrededor del 25% a más del 70%, y el diagnóstico quirúrgico superó el 90% tras la intervención. Estos resultados evidencian que las estrategias educativas estructuradas no solo facilitan la adopción de estos sistemas, sino que también optimizan la completitud y precisión de los registros, impactando positivamente en la calidad del cuidado postoperatorio [44].

En conjunto, la literatura señala que, aunque los sistemas de HCE ofrecen beneficios claros en la atención en salud, su implementación continúa enfrentando barreras relacionadas con infraestructura, conectividad, complejidad técnica, usabilidad y capacitación, particularmente en centros de menor tamaño o con recursos limitados. Estos hallazgos sustentan la necesidad de desarrollar soluciones HCE ligeras, locales, de bajo requerimiento técnico y adaptadas a contextos con conectividad limitada o inexistente.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación es de tipo aplicada con enfoque tecnológico-descriptivo, orientada al diseño, desarrollo y validación de un sistema de HCE funcional para entornos con infraestructura limitada y conectividad intermitente. El objetivo fue implementar un prototipo de historia clínica electrónica de arquitectura local, basado en un modelo offline-first, que garantizara continuidad operativa, seguridad básica de la información e interoperabilidad mediante estándares del sector salud. En este sentido, el sistema propuesto se concibe como un núcleo clínico mínimo, orientado a cubrir funcionalidades esenciales de registro y consulta, sin pretender alcanzar el nivel de complejidad funcional de los sistemas de HCE plenamente desplegados.

El modelo de datos fue diseñado para cubrir los componentes esenciales de una historia clínica electrónica básica, incluyendo módulos de configuración institucional, gestión de usuarios, historia clínica, consultas médicas, antecedentes y evaluación clínica estructurada, centrando su alcance en los elementos clínicos fundamentales y dejando fuera funcionalidades avanzadas como el soporte a la decisión clínica, la analítica de datos o la integración con sistemas externos. Asimismo, tal como se muestra en la Fig. 1, el funcionamiento del sistema se representa mediante un mapa conceptual que describe el flujo de interacción del usuario,

desde el proceso de autenticación hasta el acceso y uso de los distintos módulos.

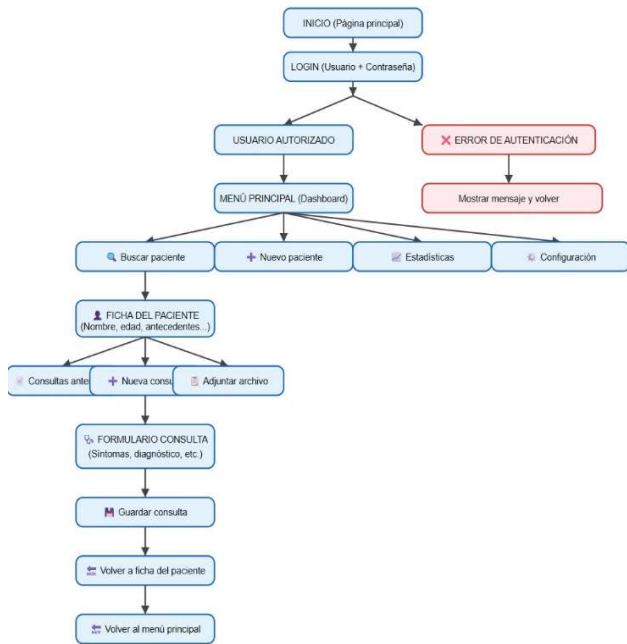


Fig. 1 Flujo de funcionamiento del sistema

En este contexto, el sistema se desarrolló como una aplicación web ligera basada en una arquitectura cliente-servidor local, con un backend implementado en Python mediante el framework Flask y una base de datos SQLite que permite el almacenamiento completamente local de la información clínica. El acceso se realiza a través de un navegador web dentro de una red interna, lo que posibilita la operación autónoma sin dependencia de una conexión permanente a Internet y asegura su disponibilidad en establecimientos de salud de menor complejidad.

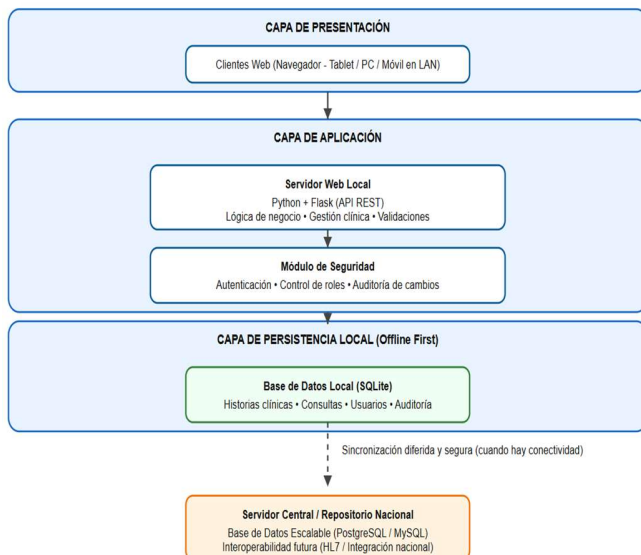


Fig. 2 Arquitectura planteada de red

Se incorporó además un sistema de auditoría interna que registra automáticamente inserciones, modificaciones y eliminaciones de datos, almacenando el usuario responsable, el campo afectado, los valores previo y posterior, y la fecha y hora de la acción. Para la sincronización en escenarios de conectividad intermitente, el sistema almacena inicialmente los registros de manera local y los marca como pendientes de transmisión. Un proceso independiente verifica periódicamente la disponibilidad de conexión y, cuando esta se restablece, envía los datos a un servidor externo utilizando estructuras inspiradas en HL7 y recursos básicos compatibles con HL7 FHIR en formato JSON, como se representa en la arquitectura de red mostrada en la Fig. 2.

Las interfaces desarrolladas para los distintos perfiles de usuario forman parte esencial de la validación funcional del sistema, ya que permiten evaluar la interacción del usuario, la accesibilidad a los módulos y la correcta ejecución de los procesos clínicos definidos. En la Fig. 3 se presentan las vistas correspondientes a los perfiles de administración y soporte técnico, donde se desarrolla la gestión de usuarios, configuración institucional y supervisión de registros. Estas interfaces fueron diseñadas bajo criterios de simplicidad y claridad visual, priorizando la reducción de carga cognitiva y facilitando la operación en entornos con limitaciones tecnológicas.

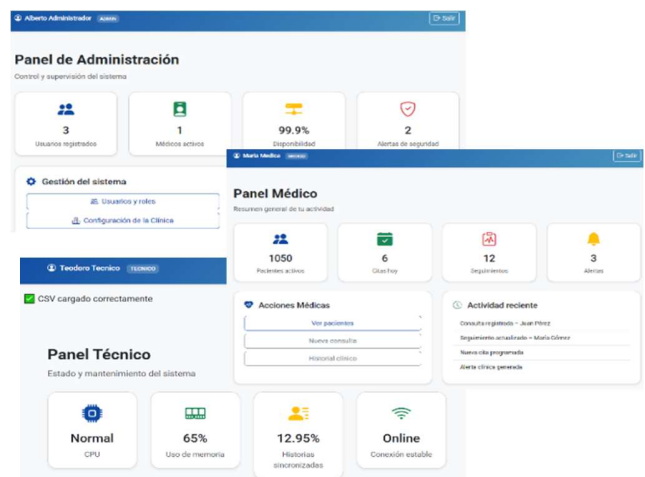


Fig. 3 Interfaces principales del prototipo para médico, administración y técnico

En el caso del perfil médico, la Fig. 4 ilustra la página de lista y búsqueda de pacientes, que permite filtrar y seleccionar registros por nombre, DNI u otros criterios relevantes. Esta vista está diseñada exclusivamente para profesionales de la salud y sirve como punto de acceso a la información clínica de cada paciente, optimizando la organización y localización de los datos.

El proceso específico de registro clínico estructurado se detalla en Fig. 5, donde se visualizan los campos destinados a antecedentes del paciente, consultas médicas y otros registros clínicos relevantes. Esta interfaz refleja la forma en que se captura y organiza la información clínica, proporcionando un flujo de trabajo claro y eficiente para la documentación médica.

En términos de seguridad, el sistema propuesto implementa autenticación mediante sesiones activas, almacenamiento de contraseñas utilizando funciones de hash seguro y control de acceso basado en roles (administrador, médico y técnico). Asimismo, se emplearon consultas parametrizadas y validaciones de entrada para reducir el riesgo de inyección SQL y errores en el almacenamiento de datos.

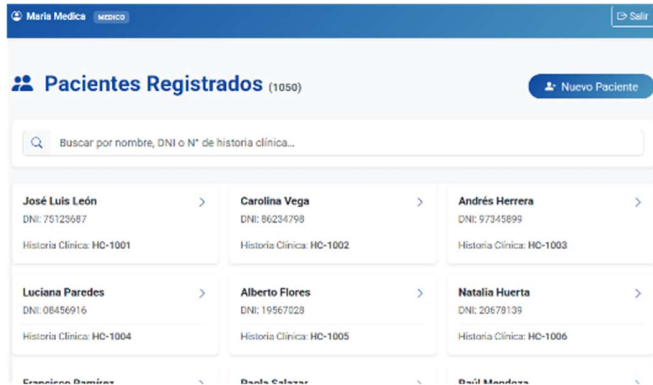


Fig. 4 Interfaz principal de la lista y selección de pacientes

Fig. 5 Campos de registro clínico, antecedentes y creación de consultas médicas

La evaluación del prototipo se realizó en un entorno local utilizando datos ficticios, con el fin de analizar integralmente la integridad de los datos, la seguridad del sistema, la sincronización de información, el control de acceso y el rendimiento bajo diferentes cargas de trabajo. Como parte de este proceso, los 15 médicos especialistas que interactuaron con el prototipo también completaron un instrumento basado en el Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM) para evaluar su utilidad, facilidad de uso e intención de adopción. La muestra fue definida por conveniencia, considerando la disponibilidad de profesionales que participaron en la evaluación del prototipo en un entorno controlado. Este instrumento utilizó una escala tipo Likert de 5 puntos (1 = totalmente en desacuerdo, 5 = totalmente de acuerdo), y el porcentaje de acuerdo se calculó

considerando las respuestas de 4 y 5. Los resultados se consideran preliminares y exploratorios, orientados a identificar tendencias iniciales de aceptación más que a constituir una validación psicométrica definitiva.

III. RESULTADOS

Las pruebas de integridad demostraron que el sistema garantiza el almacenamiento consistente de la información clínica. Se registraron 100 pacientes ficticios sin pérdida ni alteración de datos, verificándose la unicidad del identificador principal (DNI) y la prevención automática de duplicidades. Además, mantuvo estabilidad durante todas las pruebas, asegurando que cada registro clínico se almacene correctamente y pueda ser recuperado sin errores, como se aprecia en la Fig. 6.

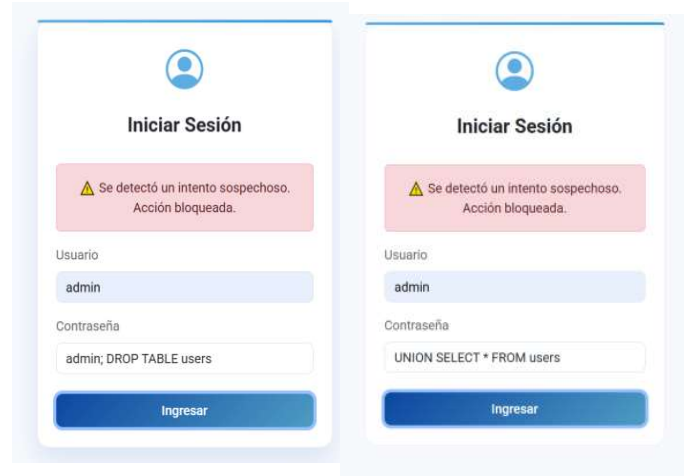


Fig. 6 Pruebas de intento de inyección SQL y su manejo seguro por el sistema

En las pruebas de seguridad, los intentos de inyección SQL introducidos en distintos campos de entrada fueron tratados como texto plano, sin generar modificaciones no autorizadas en la base de datos ni la ejecución indebida de consultas. Asimismo, se confirmó que las credenciales se almacenan mediante hash seguro, impidiendo la recuperación directa de contraseñas. La Fig. 6 muestra cómo la solución propuesta identifica y maneja estos intentos de manera segura, bloqueando automáticamente el intento y presentando un mensaje de advertencia.

La evaluación de sincronización en escenarios simulados de conectividad intermitente evidenció que el sistema puede operar completamente en modo offline. Los registros creados sin conexión fueron almacenados localmente y sincronizados automáticamente tras el restablecimiento del servicio, como se observa en Fig. 7. Además, el sistema permite la creación de usuarios sin necesidad de conexión a Internet, demostrando su autonomía operativa en entornos offline, como se muestra en Fig. 8.

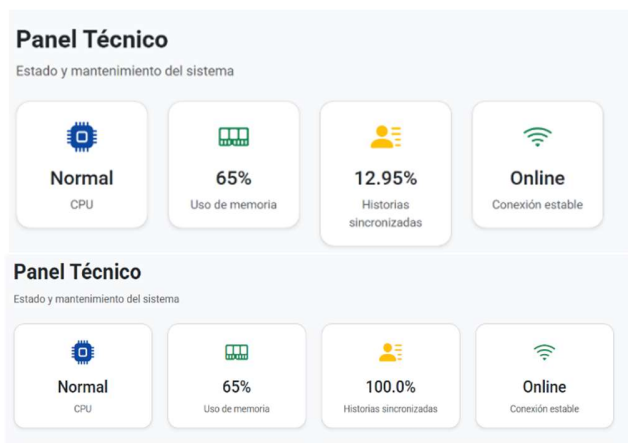


Fig. 7 Estado de sincronización: capturas mostrando 12,95 % y 100 % de registros sincronizados con estado “Online”, verde

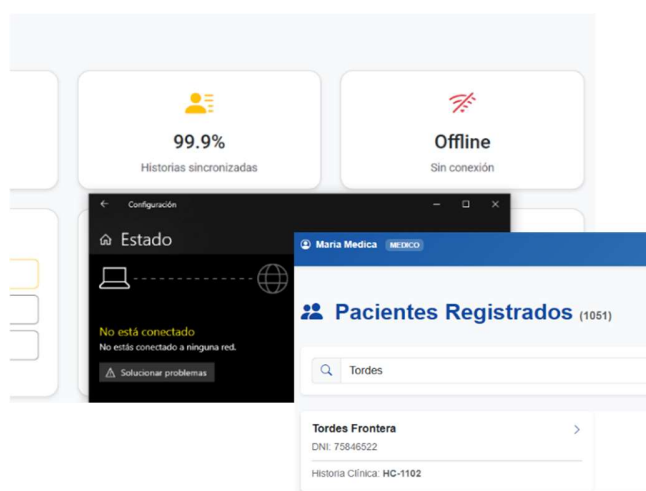


Fig. 8 Inscripción de paciente 1051 sin conexión a Internet



Fig. 9 Intento de acceso no autorizado al panel técnico desde cuenta con rol de médico

En cuanto al control de acceso, se verificó la correcta restricción de funcionalidades según el rol del usuario. Los administradores mantuvieron acceso completo, mientras que médicos y técnicos solo visualizaron las funciones

correspondientes a su perfil. Los intentos de acceso no autorizado fueron bloqueados de forma consistente, asegurando que cada usuario solo pueda interactuar con los módulos pertinentes. La Fig. 9 muestra un intento de acceso al panel técnico desde una cuenta con rol de médico, evidenciando el correcto funcionamiento de los permisos y la seguridad del sistema.

Las pruebas de rendimiento incluyeron el registro masivo de hasta 1050 pacientes ficticios y la ejecución de consultas sobre grandes volúmenes de datos. El sistema mantuvo tiempos de respuesta estables y sin degradación significativa, demostrando que la arquitectura local es capaz de manejar cargas considerables sin comprometer la experiencia de usuario. La sincronización de un registro individual presentó un tiempo promedio de 5 milisegundos, mientras que la actualización de los 1050 registros requirió 91 segundos. La Fig. 10 ilustra este proceso, mostrando la carga de pacientes, el inicio y la finalización de la sincronización, junto con la confirmación del sistema, lo que evidencia la eficiencia del prototipo.



Fig. 10. Pacientes cargados a las 4:02:21, inicio de sincronización a las 4:02:48 y finalización a las 4:03:39 con confirmación

En la evaluación de aceptación tecnológica, se aplicó el instrumento TAM a 15 médicos especialistas. Los resultados detallados de este instrumento se presentan en Table I, donde se muestran las medias, desviaciones estándar y porcentajes de acuerdo para cada ítem evaluado. Como se observa en la tabla, los valores más altos correspondieron a la implementabilidad como complemento ($M = 4.73$; 100%) y la adecuación a entornos con conectividad limitada ($M = 4.67$; 100%), mientras que el tiempo requerido para el registro clínico obtuvo la puntuación más baja ($M = 3.67$; 60%).

Los comentarios cualitativos fueron predominantemente favorables y señalaron oportunidades de mejora relacionadas con la especialización por áreas clínicas, ampliación de módulos y posible integración con sistemas externos. Dado que la evaluación se realizó en un entorno controlado y sin implementación hospitalaria real, los resultados deben

interpretarse como evidencia preliminar de viabilidad y aceptación, más que como validación clínica definitiva.

TABLA I

RESULTADOS DE MEDIA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y PORCENTAJE DE ACUERDO DEL CUESTIONARIO TAM

Nº	Item	Media	DE	% acuerdo
1	Interfaz clara	4.27	0.88	80
2	Navegación intuitiva	3.93	0.96	67
3	Organización comprensible	4.00	0.65	80
4	Facilita ingreso clínico	4.53	0.64	93
5	Tiempo de registro adecuado	3.67	0.90	60
6	Apoyo a la atención clínica	4.53	0.74	87
7	Información relevante para decisiones	4.00	0.76	73
8	Modelo clínico comprensible	3.93	0.88	67
9	Estructura ampliable	4.47	0.74	93
10	Reducción de errores clínicos	4.47	0.74	93
11	Adecuado con baja conectividad	4.67	0.49	100
12	Utilidad de funcionalidad offline pertinente	4.40	0.83	87
13	Sincronización adecuada	4.00	0.93	73
14	Adaptable a flujos clínicos	4.40	0.83	87
15	Implementable como complemento	4.73	0.46	100
16	Solución viable como prototipo	4.07	0.80	80
17	Recomendado en pruebas	4.00	0.93	73
18	Potencial de mejora futura	4.53	0.74	93
19	Aporte a digitalización clínica	4.47	0.74	93
20	Propuesta tecnológica adecuada	4.53	0.64	93

IV. DISCUSIÓN

El prototipo de Historia Clínica Electrónica desarrollado fue diseñado para operar en entornos con conectividad intermitente e infraestructura limitada. La arquitectura offline-first permitió mantener la continuidad operativa sin depender

de conexión constante, abordando barreras críticas en contextos con recursos restringidos. La adopción de estos sistemas en entornos rurales depende de diseños que funcionen localmente, sin necesidad de conectividad estable [27], [28], [10], [11], [30].

Los mecanismos de validación automática, control de acceso y sincronización diferida garantizaron la integridad y seguridad de los datos clínicos. Asimismo, la compatibilidad con estándares FHIR permite integración con otras plataformas, asegurando el intercambio confiable de datos [2], [4], [5], [6].

No obstante, el prototipo actual implementa únicamente mecanismos básicos de seguridad y control de integridad de la información, incluyendo autenticación mediante sesiones activas, almacenamiento de contraseñas con hash seguro, control de acceso por roles y auditoría interna de cambios. Elementos avanzados, como cifrado en tránsito, control de accesos granular o validaciones formales de calidad de datos, quedan fuera del alcance del prototipo, dado que este se diseñó como un núcleo clínico mínimo para entornos con infraestructura limitada y conectividad intermitente. La arquitectura modular permite, sin embargo, su incorporación progresiva en futuras mejoras, facilitando la expansión de las medidas de seguridad y control de datos cuando se disponga de los recursos y requisitos completos.

La evaluación con profesionales de la salud mostró una percepción favorable en utilidad y aplicabilidad. Sin embargo, la adaptación al ingreso de datos evidencia la importancia de la capacitación y la experiencia de usuario para la adopción plena de estos sistemas, en concordancia con estudios previos [1], [38], [41].

La comparación con otros sistemas de código abierto en entornos de baja conectividad (Tabla II) sugiere que el prototipo combina funcionalidad offline, interoperabilidad básica y adaptabilidad a entornos rurales, abordando parcialmente

TABLA II
COMPARACIÓN ENTRE APLICACIONES LIBRES DE HCE Y EL PROTOTIPO PROPUESTO

Sistema	Funcional Offline	Interoperabilidad (HL7/FHIR)	Adaptabilidad a entornos rurales	Ventajas principales	Diferencia frente al prototipo
HospitalRun	Sí (offline-first)	Parcial (JSON interno)	Media	Diseñado para baja conectividad	El prototipo ofrece sincronización automática HL7/FHIR y mayor portabilidad
Open Hospital	Parcial	No	Baja	Sistema HIS completo	El prototipo presenta arquitectura web más ligera y sincronización automática
GNU Health	Parcial	Parcial (HL7)	Media	Robusto y funcionalidad amplia	El prototipo requiere menor infraestructura y no demanda personal técnico especializado
LibreHealth EHR	No	Parcial (API HL7)	Baja	Comunidad activa y modularidad	El prototipo funciona completamente offline y no depende de servidores externos
PROTOTIPO PROPUESTO	Sí (offline-first)	Sí (HL7/FHIR)	Alta	Ligero, portable y escalable	Evaluación preliminar en entorno controlado

limitaciones reportadas en otras soluciones. Sin embargo, entre sus limitaciones se incluyen la muestra reducida, la falta de implementación prolongada en entornos clínicos reales y el carácter exploratorio del TAM; por ello, los resultados deben interpretarse como evidencia preliminar de viabilidad, a diferencia de estudios con muestras más amplias y análisis robustos.

El sistema demuestra la factibilidad de implementar funcionalidades esenciales con tecnologías ligeras como Flask y SQLite3. A pesar de sus limitaciones, la arquitectura se muestra viable y adecuada para entornos con conectividad limitada [27], [10], [29].

Para trabajos futuros, se recomienda incorporar un catálogo de enfermedades basado en CIE-10 y un módulo DICOM, con el fin de fortalecer la interoperabilidad y el seguimiento clínico [30], [28].

V. CONCLUSIONES

Este estudio presentó el diseño, implementación y evaluación de un prototipo de Historia Clínica Electrónica de núcleo clínico mínimo, basado en una arquitectura offline-first, orientado a entornos con conectividad intermitente. La solución desarrollada permitió el funcionamiento autónomo sin conexión, garantizando el almacenamiento local seguro, la integridad de los datos y un mecanismo de sincronización confiable basado en estándares de interoperabilidad.

Los resultados técnicos evidenciaron un desempeño estable, con correcta gestión de datos, control de acceso seguro y sincronización sin pérdida de información. Asimismo, la evaluación de aceptación tecnológica mostró una percepción positiva por parte de los profesionales de la salud, destacando su utilidad en contextos con recursos limitados.

En conjunto, los resultados confirman la viabilidad de la propuesta para mejorar la continuidad y gestión de la información clínica en entornos de baja conectividad. Como trabajo futuro, se plantea la incorporación de funcionalidades que fortalezcan la interoperabilidad, así como los mecanismos de seguridad y calidad de datos.

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a Dios, por guiarnos y darnos la fortaleza necesaria para realizar esta investigación. A nuestros padres, por su apoyo incondicional, paciencia y motivación constante durante todo el proceso. A nuestro asesor, por su orientación, enseñanza y dedicación, que fueron fundamentales para la concreción de este proyecto. Finalmente, agradecemos a todas las personas que participaron en las encuestas y colaboraron de manera directa o indirecta, haciendo posible la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

[1] Y. Shen, J. Yu, J. Zhou, and G. Hu, "Twenty-Five Years of Evolution and Hurdles in Electronic Health Records and Interoperability in Medical Research: Comprehensive Review," *J. Med. Internet Res.*, vol. 27, p. e59024, 2025, doi: 10.2196/59024.

[2] B. Chimbo y L. Motsi, "The Effects of Electronic Health Records on Medical Error Reduction: Extension of the DeLone and McLean Information System Success Model," *JMIR Med. Inform.*, vol. 12, p. e54572, 16-Oct-2024, doi: 10.2196/54572.

[3] Organización Panamericana de la Salud, Historias clínicas electrónicas y la importancia de cómo documentar, documento OPS/EIH/IS/21-022, 2021.

[4] G. Tewfik, S. Rivoli y E. Methangkool, "The electronic health record: does it enhance or distract from patient safety?," *Curr. Opin. Anaesthesiol.*, vol. 37, no. 6, pp. 676–682, Dec. 2024, doi: 10.1097/ACO.0000000000001429.

[5] P. Tabari et al., "State-of-the-Art Fast Healthcare Interoperability Resources (FHIR)-Based Data Model and Structure Implementations: Systematic Scoping Review," *JMIR Med. Inform.*, vol. 12, p. e58445, Sep. 2024, doi: 10.2196/58445.

[6] T.-J. Liu, H.-T. Lee, and F. Wu, "Building an Electronic Medical Record System Exchanged in FHIR Format and Its Visual Presentation," *Healthcare*, vol. 11, no. 17, p. 2410, 2023, doi: 10.3390/healthcare11172410. [CD]

[7] M. Engelke et al., "FHIR-Former: Enhancing Clinical Predictions through Fast Healthcare Interoperability Resources and Large Language Models," *J. Am. Med. Inform. Assoc.*, 2025, doi: 10.1093/jamia/ocaf165. [CD]

[8] A. Fallahpour, M. Alinoori, W. Ye, X. Cao, A. Afkanpour, and A. Krishnan, "HCEMamba: Towards Generalizable and Scalable Foundation Models for Electronic Health Records," *arXiv preprint arXiv:2405.13833*, Nov. 2024.

[9] E. Martens et al., "Smart Hospital: Achieving Interoperability and Raw Data Collection from Medical Devices in Clinical Routine," *Front. Digit. Health*, vol. 6, Mar. 2024, doi: 10.3389/fdgth.2024.1341475.

[10] T. Brotherton et al., "Development of an Offline, Open-Source, Electronic Health Record System for Refugee Care," *Front. Digit. Health*, vol. 4, Mar. 2022, doi: 10.3389/fdgth.2022.847002.

[11] H. D. Mugauri and M. Chimsimbe, "Electronic Health Record Systems in Limited Resource Settings: A Comprehensive Evaluation of the Impilo Platform," *Acta Inf. Pragensia*, vol. 14, no. 3, pp. 393–407, 2025, doi: 10.18267/j.aip.265.

[12] Chapman, AR. Evaluación de la meta de cobertura sanitaria universal en los Objetivos de Desarrollo Sostenible desde una perspectiva de derechos humanos. *BMC Int Health Hum Rights* 16 , 33 (2016). <https://doi.org/10.1186/s12914-016-0106-y>

[13] Buzdugan, M. I., Bălan, H., & Mureșan, D. T. (2010). An electrical power quality problem in an emergency unit from a hospital—Case study. In *SPEEDAM 2010* (pp. 251–256). IEEE.

[14] E. Katz, M. Rivoir, and A. Hilbert, Un camino digital para América Latina y el Caribe: El progreso digital y la nueva institucionalidad. Santiago de Chile: CEPAL, 2022. [Online]. Available: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/48460/S2200899_es.pdf

[15] Transform Health Coalition, Latin America Regional Brief. Transform Health, 2023. [Online]. Available: <https://transformhealthcoalition.org/wp-content/uploads/2023/08/Latin-America-Regional-Brief-English-v2.pdf>

[16] Pan American Health Organization, Digital Health for Maternal Health: Advances and Challenges in Latin America and the Caribbean. Washington D.C.: PAHO, 2024. [Online]. Available: <https://www.paho.org/en/news/7-3-2024-digital-health-maternal-health-advances-and-challenges-latin-america-and-caribbean>

[17] Global Health Intelligence, "Persisting barriers to the adoption of telemedicine in Latin America after the COVID-19 pandemic," *GHI Analysis*, 2024. [Online]. Available: <https://globalhealthintelligence.com/ghi-analysis/persisting-barriers-to-the-adoption-of-telemedicine-in-latin-america-after-the-covid-19-pandemic-part-1/>

[18] Common Perú, Digitalización de la salud en el Perú: Avances, desafíos y perspectivas hacia el 2025, Lima: CommonPeru / MINSA, 2024. [Online]. Available: <https://digital.commonperu.pe/index.php/locales/51573-digitalizacion-de-la-salud-en-el-peru-avances-desafios-y-perspectivas-hacia-el-2025>

- [19] OECD, *OECD Reviews of Health Systems: Peru 2025*. Paris: OECD Publishing, 2025, doi: 10.1787/f3ddb6a4-en.
- [20] Ministerio de Salud del Perú, *Interoperabilidad de Historia Clínica Electrónica*. Lima: MINSA, 2024.
- [21] Ministerio de Salud del Perú, "Directiva Administrativa N.º 373-MINSA-OGTI-2025," Mar. 2025.
- [22] Ministerio de Salud del Perú, *Plan de Gobierno Digital del Ministerio de Salud 2024–2026*, Resolución Ministerial N.º 317-2024-MINSA, May 2024.
- [23] M. K. Hossain et al., "An Exploratory Study of Electronic Medical Record Implementation and Recordkeeping Culture: The Case of Hospitals in Indonesia," *BMC Health Serv. Res.*, vol. 25, p. 249, 2025, doi: 10.1186/s12913-025-12399-0.
- [24] D. W. Utami and M. Arini, "Electronic Medical Record in Developing Countries: Research Streams, Influential Works, and Future Research Paths," *J. Public Health Dev.*, vol. 23, no. 2, pp. 320–338, 2025, doi: 10.55131/jphd/2025/230222.
- [25] B. A. Bolatito and T. O. Togunwa, "Barriers to the Adoption of Electronic Health Records in Nigerian Healthcare Systems: Analysing Infrastructure, Training and Policy Challenges," *Univ. of Ibadan / Univ. of Michigan*, Dec. 2024.
- [26] A. Agbeyangi and H. Suleman, *Patterns for Software Systems in Low-Resource Environments*. 2023.
- [27] N. Syzydykova, E. Malta, L. Zolfo, H. Diro y L. Oliveira, "Open-Source Electronic Health Record Systems for Low-Resource Settings," *BMC Med. Inform. Decis. Mak.*, vol. 17, no. 70, 2017.
- [28] A. Bostan, R. Johnson, S. Jaspersen y D. Randell, "Contextual Barriers to Implementing Open-Source Electronic Health Record Systems for Low- and Lower-Middle-Income Countries," 2024.
- [29] M. Syzydykova, et al., "Implementing an Open Source Electronic Health Record System in Kenyan Health Care Facilities," *JMIR Med Inform.*, vol. 6, 2018.
- [30] A. BMC, "Benefits and challenges of EMR implementations in low resource settings," *BMC Med Inform Decis Mak.*, 2016.
- [31] Dutta, B., & Bain, D. (2025). "A Quantitative Approach to Evaluating Open-Source HCE Systems for Indian Healthcare," *arXiv preprint arXiv:2504.08750*, 2025.
- [32] Gashayija, F., Renzaho, J.N., Nsanzabera, C. (2025). "Factors Associated With Adoption of Electronic Medical Record System among Healthcare Providers in Kirehe District Health Facilities, Rwanda," *Journal of Health, Medicine & Nursing*, vol. 11, no. 3, pp. 34, 2025.
- [33] Uwambajimana, E., et al. (2024). "Assessment of the use of electronic medical records system and barriers in Rwanda," *Research Article*, 2024.
- [34] Bouh, M.M., Hossain, F., Paul, P., et al. (2024). "The impact of limited access to digital health records on doctors and their willingness to adopt electronic health record systems," *DIGITAL HEALTH*, vol. 10, 2024.
- [35] İ. Köse et al. (2023). "Basic electronic health record (HCE) adoption in Türkiye is nearly complete but challenges persist," *BMC Health Services Research*, vol. 23, no. 1, p. 987, Sep. 14, 2023.
- [36] Fraser, H.S.F., et al. (2024). "Factors Influencing Data Quality in Electronic Health Record Systems in 50 Health Facilities in Rwanda and the Role of Clinical Alerts: Cross-Sectional Observational Study," *JMIR Public Health Surveill.*, vol. 10, e49127, 2024.
- [37] Uwase, M., et al. (2025). "Data Quality Assessment in mUzima-OpenMRS: A Mobile Application Used by Community Health Workers for Screening Hypertension and Diabetes in Rwanda," *Studies in Health Technology and Informatics*, vol. 328, pp. 387-391, 2025.
- [38] Classen, D. C., et al. (2023). "Inpatient HCE User Experience and Hospital HCE Safety Performance," *JAMA Network Open*, vol. 6, no. 9, e2333152, 2023.
- [39] É. Maillet, L. M. Currie, G. Strudwick, and V. Dubé (2024). "Association Between HCE Compatibility and Nurses' Emotional Exhaustion," in *Innovation in Applied Nursing Informatics*, G. Strudwick et al., Eds. IOS Press.
- [40] J. Holmgren, L. Rotenstein, N. L. Downing, D. W. Bates, and K. Schulman (2022). "Association between state-level malpractice environment and clinician electronic health record (HCE) time," *J. Am. Med. Inform. Assoc.*, vol. 29, no. 6, pp. 1069–1077, Jun. 2022.
- [41] Dawson, B., et al. (2010). "Chart smart: a need for documentation and billing education among emergency medicine residents?," *West J. Emerg. Med.*, vol. 11, no. 2, pp. 116–119, May 2010.
- [42] E. L. Lee, A. Chisty, P. Williams, and W. Brady (2017). "An Innovative Curriculum Using a Simulated Electronic Health Record to Teach Internal Medicine Residents About ICD-10-CM," *MedEdPORTAL*, vol. 13, pp. 10538.
- [43] Arcelli Fontana, F., et al. (2023). "Impact of Architectural Smells on Software Performance: an Exploratory Study," *Proceedings of the International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE)*, Oulu, Finland.
- [44] Samuilova, A., & Nursapa, S. (2025). "Using A Transformer To Evaluate The Impact Of Architectural Smells On Software Performance," *Proceedings of the International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE)*, Oulu, Finland.