

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY
CAMPUS QUERÉTARO
DEPARTAMENTO DE COMPUTACIÓN Y MECATRÓNICA



**Sistema de registros electrónicos personales de salud para su
distribución en Blockchain**

por

Misael Guzmán Gutiérrez

Proyecto Integrador para el Desarrollo de Soluciones Empresariales

Ingeniería

en

Sistemas Computacionales

Asesor: Dr. José Antonio Cantoral Ceballos

Santiago de Querétaro, Querétaro. México
14/05/2024

Abstract

En el contexto actual, donde la seguridad y privacidad de los datos de salud son una constante inquietud para la industria tecnológica de salud o healthcare 4.0, la tecnología blockchain se presenta como una solución innovadora para la gestión de los datos. Este trabajo propone una solución web basada en esta tecnología para la gestión de registros electrónicos de salud (EHR), empleando Swarm para el almacenamiento de datos. Esta investigación tiene como objetivo evaluar la trazabilidad, seguridad y transparencia de las transacciones de datos entre pacientes y médicos, poniendo a prueba la eficiencia y el rendimiento de Swarm dentro del marco de blockchain. El estudio se enfoca en evolucionar hacia una digitalización integral del sector salud, protegiendo la información personal y disponiendo de una atención médica personalizada y más eficiente. Se prevé que los resultados aportarán evidencia para la adopción de estas tecnologías en el campo de la salud, siendo un grano de arena hacia la resolución de problemas de interoperabilidad y seguridad de datos.

Índice general

Abstract	2
Acrónimos	4
1. Introducción	5
1.1 Declaración del problema	6
1.2 Objetivos	7
1.3 Hipótesis	7
2. Estado del arte	8
2.1 Contexto del área	8
2.2 Tipos de registros	9
2.3 Blockchain como solución potencial	9
2.4 Trabajos relevantes al tema	11
2.5 Comparación entre sistemas	13
2.6 Conclusión	14
3. Planteamiento de la solución	15
3.1 Diseño de prototipo	15
3.2 Arquitectura	17
3.3 Solución como almacenamiento descentralizado	20
3.4 Flujo del sistema	21
4. Metodología de investigación o Experimento	22
2.6 Evaluación de rendimiento y análisis práctico	22
5. Resultados	23
5.1 Costos	23
5.2 Observaciones en las gráficas	24
5.3 Discusión	26
6. Conclusiones y trabajo futuro	27
6.1 Trabajo futuro	28

Acrónimos

SC	Smart Contract
EHR	Electronic Health Record
EPHR	Electronic Patient Health Record
GDPR	General Data Protection Regulation

Capítulo 1

Introducción

Durante la pandemia, los servicios de salud digital se vieron obligados a robustecer e innovar en sus métodos operativos para enfrentar los desafíos emergentes.[1] En este contexto, la tecnología blockchain ha ganado relevancia como una solución prometedora para abordar problemas críticos en la gestión de datos médicos. Blockchain, una tecnología que almacena datos de manera transparente, distribuida e inmutable, elimina la necesidad de intermediarios y garantiza la integridad de la información. Su capacidad para crear registros inmutables mediante el uso de criptografía y nodos descentralizados, donde cada bloque se enlaza secuencialmente con el anterior, ofrece una estructura robusta para la gestión segura de datos sensibles, como los registros médicos.[2]

Los sistemas de registros electrónicos de salud (EHR) actuales, aunque son una mejora significativa en comparación con los registros en papel, enfrentan varios desafíos. Las preocupaciones sobre la seguridad y la privacidad de los datos, la falta de interoperabilidad y la centralización que limita el acceso y control del paciente sobre sus propios datos médicos son algunos de los principales problemas. Además, los EHR tradicionales pueden ser vulnerables a violaciones de datos, lo que conlleva riesgos de exposición de información sensible del paciente. [4] La interoperabilidad limitada dificulta el intercambio de información entre diferentes proveedores de atención médica, afectando la continuidad y calidad del cuidado al paciente. La centralización de los datos puede restringir el control del paciente sobre sus propios registros de salud, impidiéndoles gestionar quién tiene acceso a su información y cuándo. La implementación de blockchain en los EHR

promete abordar estos problemas al ofrecer una plataforma más segura, interoperable y centrada en el paciente, mejorando la flexibilidad y fiabilidad del sistema.[4]

Blockchain tiene el potencial de gestionar gestión más eficientemente los permisos de acceso a los registros médicos, garantizando que solo las partes autorizadas puedan acceder a la información del paciente. Además, la descentralización de los datos médicos mejora la resiliencia del sistema, reduciendo los puntos únicos de fallo y mitigando los riesgos de ataques cibernéticos.[2][5] Al proporcionar un marco para la creación de sistemas de salud más centrados en el paciente y menos dependientes de intermediarios, blockchain facilita una atención médica más personalizada y segura. La adopción de esta tecnología puede ser un paso significativo hacia la digitalización integral del sector salud, mejorando la experiencia del paciente y fortaleciendo la confianza en la gestión de datos médicos. [1]

1.1. Declaración del problema

En el contexto actual, hay muy pocos sistemas que aprovechen las ventajas del blockchain para la gestión de registros de salud. La fragmentación de registros médicos del paciente entre múltiples sistemas e instituciones dificulta la comunicación eficiente y la gestión de datos de salud. Además, la variabilidad en la adopción de sistemas EHR y las diferencias en las prácticas de documentación clínica entre profesionales médicos presentan desafíos significativos para la consistencia y calidad del cuidado del paciente. Por lo tanto, es esencial abordar estas brechas para mejorar la gestión y la interoperabilidad de los registros de salud.

1.2. Objetivos:

Esta tesina se centra en el uso de Blockchain para el desarrollo de una plataforma web en donde el paciente pueda subir sus archivos a una red de almacenamiento descentralizado y gestionar los permisos de acceso para los doctores de su lista. Esto permitirá al paciente tener un control total sobre sus datos de salud y mejorar la seguridad y privacidad de la información compartida con los proveedores de atención médica. Dicho objetivo puede ser dividido en objetivos secundarios, los cuales son:

1. Investigación sobre el lenguaje Solidity usado para smart contracts, para la posterior implementación del sistema.
2. Desarrollo e implementación del software.
3. Pruebas y correcciones pertinentes.
4. Evaluación en resultados y registro de métricas.
5. Entrega final de la tesina la cuál incluirá métricas, gráficas, conclusiones y trabajo futuro.

1.3. Hipótesis:

La implementación de una plataforma de registros electrónicos personales de salud (EPHR) utilizando tecnología blockchain permitirá una gestión más segura y eficiente de los datos de salud del paciente, mejorando la privacidad y el control de acceso a la información, y reduciendo los costos operativos en comparación con los sistemas tradicionales de EHR.

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo se explora el concepto e implementación del blockchain y sus principales propuestas de innovación en la gestión y uso de los datos médicos, así como el uso de contratos inteligentes para la automatización y fidelización de la lógica entre las partes interesadas en función de generar sistemas más centrados en el paciente. Se llevará a cabo un análisis de los trabajos más relevantes en este campo, con el objetivo de identificar las áreas que requieren un mayor desarrollo para la consolidación de ésta tecnología como un medio seguro para la transferencia de datos. A través de éste análisis, se busca comprender cómo los SC pueden potenciar la comunicación entre pacientes y doctores sin un intermediario de por medio.

2.1. Contexto del Área

La era de la cuarta revolución sanitaria o Healthcare 4.0 comprende la innovación médica al tiempo de mejorar la eficiencia de la atención al paciente. Se enfoca en proveer una mejor operabilidad dentro de un ecosistema de múltiples stakeholders, incluidos médicos, pacientes, cuerpos públicos, y organizaciones privadas mediante tecnologías como el Big Data, IoT, cloud computing, AI[1].

Como cualquier revolución, el sector de salud se ha rezagado en la implementación de la transformación digital. La complejidad y regulación del sector han llevado a la creación de silos de información de salud, limitando la innovación digital y exacerbando problemas de privacidad. Esto ha generado poca confianza en el manejo y seguridad de los datos. Entre 2010 y 2017, se reportaron 2149 brechas de seguridad en EE.UU., afectando a 174.4 millones de registros. [2][3]

2.2. Tipos de registros

Los tipos de registros médicos son los siguientes:

- EMR: Recopila diagnósticos, tratamientos y medicamentos para seguir la evolución del paciente. Brinda acceso rápido a datos básicos como edad y peso, facilitando tratamientos personalizados. Sin embargo, la dificultad para compartir información entre departamentos médicos requiere procesos manuales de intercambio y actualización. [3]
- EHR: A diferencia del anterior, permite recolectar y compartir información desde múltiples fuentes. El beneficio inherente de este tipo de registro es el mejoramiento diagnóstico y tratamiento de pacientes y doctores. [3] [4]
- EPHR: En este tipo de registro el usuario final es el paciente, el cual es responsable de actualizar y mantener sus datos a la fecha. [3]

2.3. Blockchain como solución potencial

Blockchain es una tecnología emergente que almacena datos de manera transparente, distribuida e inmutable, eliminando la necesidad de intermediarios y garantizando la integridad de la información. Su origen se remonta a 1991, pero se popularizó en 2008 con el desarrollo de Bitcoin. Esta tecnología se basa en una cadena de bloques, donde cada bloque contiene un conjunto de transacciones verificadas y enlazadas mediante criptografía [2]. La inmutabilidad de los datos y la descentralización son características clave que hacen de

blockchain una solución atractiva para la gestión de datos sensibles, como los registros médicos [2][3][4][5].

2.3.1 Principios de los Smart Contracts (SC)

Los *smart contracts* son programas que se ejecutan automáticamente cuando se cumplen ciertas condiciones predefinidas. Estos contratos se almacenan en una blockchain, asegurando su inmutabilidad y ejecución sin intermediarios. En el contexto de la salud, los SC pueden automatizar procesos complejos mediante reglas predefinidas que se ejecutan automáticamente cuando se cumplen ciertas condiciones, como la gestión de permisos de acceso a los registros médicos, asegurando que solo las partes autorizadas puedan acceder a la información del paciente. [8] Esto no solo mejora la seguridad, privacidad de los datos; y permite una reducción de costos, sino que también incrementa la eficiencia operativa al reducir la necesidad de intermediarios y minimizar el riesgo de errores humanos. [3][8]

La integración del Blockchain y los SC se presenta como una solución innovadora para superar los desafíos actuales en la gestión de registros médicos.

2.3.2 Ventajas del blockchain en la salud

- Trazabilidad y transparencia: La inherente inmutabilidad y transparencia de los registros que se almacenan en cada transacción dentro del Blockchain, generan una mayor visibilidad y confianza en la gestión de datos. [3] Esto es crucial en el sector de la salud, donde la precisión y la trazabilidad de los datos pueden tener un impacto directo en la calidad de la atención al paciente. [4]
- Seguridad y Privacidad: La naturaleza descentralizada y criptográfica de blockchain garantiza que los datos sean altamente seguros y resistentes a manipulaciones. [2][3] Cada transacción debe ser validada por la red, lo que previene fraudes y accesos no autorizados. Esto es especialmente relevante en la gestión de registros médicos, donde la protección de datos personales es fundamental. [6]

- Descentralización: Al no depender de una autoridad central, blockchain elimina los puntos únicos de fallo y reduce el riesgo de ataques cibernéticos. Esto permite una gestión más segura y eficiente de los datos médicos, facilitando el acceso a la información de salud desde cualquier lugar y en cualquier momento, siempre que se cuente con los permisos adecuados [7].

2.4. Trabajos relevantes al tema

En esta sección se analizan los trabajos más relevantes en el campo de los registros de salud personales electrónicos (EHR) basados en blockchain. Se discutirán diversas propuestas, sus enfoques, arquitecturas y resultados obtenidos, con el objetivo de identificar las áreas que requieren un mayor desarrollo para la consolidación de esta tecnología como un medio seguro y eficiente para la gestión y transferencia de datos médicos.

2.4.1 PatientDataChain: A Blockchain-Based Approach to Integrate Personal Health Records

El trabajo de Cernian et al. presenta PatientDataChain, una arquitectura descentralizada basada en blockchain para integrar sistemas de registros de salud del paciente. Este modelo se centra en el paciente, permitiéndole ser el propietario de sus datos médicos y otorgar acceso a los proveedores de atención médica según sea necesario. Utilizando la base de datos blockchain Modex (BCDB), el sistema combina arquitecturas tradicionales de cliente-servidor con aplicaciones basadas en blockchain para garantizar la integridad y la inmutabilidad de los datos. La validación se realizó mediante un piloto en una clínica médica en Bucarest, demostrando la viabilidad del modelo para integrar registros de salud personales de fuentes heterogéneas en un sistema PHR unificado y descentralizado. [4]

2.4.2 Analyzing the Performance of a Blockchain-Based Personal Health Record Implementation

Roehrs et al. presentan la implementación y evaluación de un modelo PHR que integra registros de salud distribuidos utilizando tecnología blockchain y el estándar de interoperabilidad openEHR. El modelo, denominado OmniPHR, se evaluó mediante un prototipo que manejó datos de más de 40,000 pacientes adultos, demostrando un tiempo de respuesta promedio inferior a 500ms y una disponibilidad del 98%. Los resultados indican que los datos distribuidos mediante blockchain pueden recuperarse con alta disponibilidad y bajo tiempo de respuesta, destacando la capacidad de la arquitectura OmniPHR para integrar datos de salud distribuidos en una vista unificada. [6]

2.4.3 Generic Patient-Centered Blockchain-Based EHR Management System

Haddad et al. proponen un sistema de gestión de registros de salud electrónicos (EHR) basado en blockchain y centrado en el paciente. Utilizando blockchain de Ethereum y el sistema de archivos interplanetarios (IPFS), el sistema permite a los pacientes gestionar sus registros de salud a través de múltiples partes interesadas, garantizando la privacidad y el control de los datos sin necesidad de una infraestructura centralizada. Los resultados del estudio indican que la estrategia propuesta es eficiente y viable, proporcionando un control seguro y distribuido del acceso a los datos médicos. [8]

2.5. Comparación entre sistemas

Comparando los tres sistemas anteriormente descritos, encontramos que cada uno tiene un enfoque para mejorar la gestión de registros de salud mediante el uso de esta tecnología. PatientDataChain se enfoca en la descentralización y en proporcionar el control total al

paciente sobre sus datos médicos, utilizando Modex BCBD para garantizar integridad e inmutabilidad sobre los datos. Su implementación en una clínica médica demuestra su viabilidad, sin embargo, enfrenta desafíos en la integración con sistemas tradicionales.

Por otro lado, OmniPHR, evaluado en [6], destaca por su alta disponibilidad y bajo tiempo de respuesta, integrando datos distribuidos en una vista unificada mediante el uso del estandar OpenEHR. Este sistema no solo aborda la interoperabilidad sino también la escalabilidad, lo que lo hace adecuado para manejar grandes volúmenes de datos médicos de manera eficiente, aunque depende en gran medida de la infraestructura blockchain, lo que puede ser un desafío en términos de implementación y mantenimiento.

Por último, el sistema propuesto por Haddad et al. centra su enfoque en la privacidad y el control del paciente, utilizando contratos inteligentes para gestionar el acceso a los datos y reduciendo costos mediante el almacenamiento distribuido en IPFS. Aunque es eficiente y viable, su dependencia de Ethereum e IPFS podría presentar limitaciones en términos de costos y complejidad técnica.

Con esto dicho, se puede decir que PatientDataChain y el sistema de Haddad et al. se enfocan en la descentralización y el control del paciente, mientras que OmniPHR destaca por su enfoque en la interoperabilidad y escalabilidad (Comparativa en la siguiente tabla).

Sistema	Ventajas	Desventajas	Tecnología	Gestión de usuarios
<i>PatientDataChain</i>	Integridad y inmutabilidad de datos, descentralización, Health Wallet para gestión de datos	Complejidad en la integración con sistemas tradicionales	Modex BCDB, SDK para Java, Go, JavaScript	Propiedad de datos por el paciente, acceso controlado por el paciente
<i>OmniPHR</i>	Alta disponibilidad, bajo tiempo de respuesta, interoperabilidad con openEHR, escalabilidad	Dependencia de la infraestructura blockchain	OpenEHR, Blockchain	Datos distribuidos recuperables, vista unificada de datos

<i>EHR Management System</i>	Control seguro y distribuido, privacidad de datos, reducción de costos de almacenamiento con IPFS	Dependencia de Ethereum e IPFS	Ethereum, IPFS, SC	Gestión de registros por múltiples partes interesadas, control de acceso por el paciente
------------------------------	---	--------------------------------	--------------------	--

Tabla 1. Comparativa entre los diferentes sistemas

2.6. Conclusión

En el estado del arte se han explorado distintas formas de integrar el Blockchain en la gestión de registros electrónicos de salud (EHR), ofreciendo un gran potencial para mejorar la seguridad e interoperabilidad de los datos médicos. La descentralización y la inmutabilidad de los datos son ventajas significativas que blockchain ofrece, superando las limitaciones de los sistemas tradicionales de EHR. Además, los contratos inteligentes (SC) permiten la automatización segura de procesos complejos, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo la necesidad de intermediarios.

Sin embargo, la adopción de blockchain en el sector salud enfrenta desafíos como la complejidad técnica, los costos de implementación y las barreras regulatorias. Los estudios revisados indican que la interoperabilidad y la escalabilidad son áreas clave que requieren mayor desarrollo para la consolidación de esta tecnología en el ámbito de la salud.

Capítulo 3

Planteamiento de la solución

En este capítulo se explicará de manera detallada la solución diseñada, así como la arquitectura y las funcionalidades del sistema presentadas. La interacción entre los usuarios y varias decisiones arquitectónicas se justifican para crear un sistema replicable.

3.1 Diseño de prototipo

3.1.1 Funcionalidades

El sistema MediHeart se concentra principalmente en que el paciente tenga el control de sus datos de salud, permitiéndole agregar registros médicos a la plataforma y otorgar o revocar acceso a estos registros.

El sistema tiene acceso basado en roles, lo cual ayuda a restringir ciertas funcionalidades dependiendo el tipo de usuario. Estas acciones son manejadas desde el frontend y backend, reforzando cada rol y lo que puede hacer dentro del prototipo. Los roles principales son el doctor, y el paciente. También hay un usuario con el rol de administrador encargado del despliegue y tareas administrativas.

En el siguiente diagrama de caso de uso 3.1, se muestra la representación de las funcionalidades implementadas en el sistema, así como qué actores interactúan con éstas.

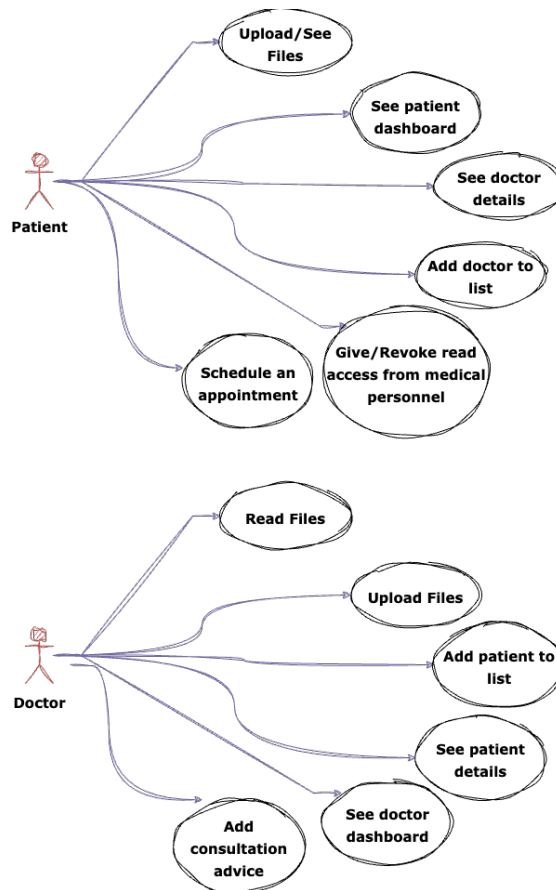


Imagen 3.1 Diagrama de caso de uso EPHR

3.2 Arquitectura

La parte del cliente o frontend fue construida usando la librería NextJs 12.0, el backend fue deployado mediante un contrato inteligente(SC) escrito en Solidity 0.8.9 sobre la red de prueba de Ethereum Sepolia usando Truffle(HDWalletProvider) 2.1.15. Al mismo tiempo se uso Swarm como un sistema de almacenamiento descentralizado para los archivos médicos. La API de BeeSwarm se integró en el frontend para gestionar la carga y recuperación de archivos de manera eficiente y segura, facilitando la interacción del usuario con el almacenamiento descentralizado.

3.2.1 Backend

Al ser una solución que utiliza blockchain, los contratos inteligentes funcionan como un backend descentralizado. Fue compuesto de esta manera con el objetivo de evitar algún problema de sincronización entre un backend centralizado y la transacción emitida desde Ethereum.

En este caso se decidió optar por hacer 3 contratos inteligentes (SC): Doctor.sol, Patient.sol y EHR.sol. Los dos primeros contienen las estructuras y funcionalidades funciones específicas para gestionar la información y las interacciones de doctores y pacientes, respectivamente. Por su parte, EHR.sol actúa como el contrato principal que engloba a los otros dos, proporcionando una capa adicional de seguridad y facilitando la integración de funcionalidades mediante llamadas a las interfaces de los contratos específicos. Esta organización modular permite un intercambio de datos eficiente y seguro, asegurando que cada función y estructura esté correctamente aislada y gestionada, además de permitir la escalabilidad del sistema de manera más sencilla.

El modelo de datos del sistema está diseñado para ser robusto y flexible, con estructuras específicas para doctores y pacientes que facilitan la gestión de la información y las interacciones. En Doctor.sol, la estructura doctor incluye atributos como nombre, teléfono, especialización y una lista de pacientes, lo que permite una gestión detallada de cada médico y sus relaciones con los pacientes. De manera similar, Patient.sol define una estructura patient que almacena información esencial del paciente, como nombre, edad, teléfono, correo electrónico y una lista de doctores asociados (Figura 3.2). Ambas estructuras están respaldadas por funciones que permiten la actualización y recuperación eficiente de datos, garantizando que cada entidad mantenga un registro preciso y accesible. La integración de estos modelos de datos en EHR.sol mediante interfaces permite centralizar y coordinar las operaciones, mejorando la consistencia y la seguridad en el intercambio de datos médicos.



Imagen 3.2 Modelo de datos EpHR

Para garantizar la calidad y funcionalidad del contrato, se utilizaron pruebas automatizadas con Mocha. Se tradujo el ABI (Application Binary Interface) a JavaScript para poder interactuar con los contratos inteligentes y simular diversos escenarios de uso. Estas pruebas validaron que las funciones de registro, consulta y gestión de archivos funcionaran correctamente, asegurando que tanto doctores como pacientes pudieran interactuar con el sistema de manera eficiente y segura.

3.2.2 Frontend

Con el objetivo de proveer una interfaz amigable a una aplicación descentralizada, se decidió usar NextJs 12.0. Esta librería de React, permite una conexión sencilla a diferentes redes de Ethereum, pero sobretodo genera un ruteo dinámico a partir de la cuenta del usuario, por lo que extiende seguridad al navegar por la plataforma. Por otro lado, NextJs permite manejar diferentes peticiones al blockchain de manera sencilla. Además, para la creación de componentes se implementaron mediante SemanticUIReact, lo cuál facilitó la creación de componentes con el propósito de proveer una mejor experiencia de usuario y de diseño.

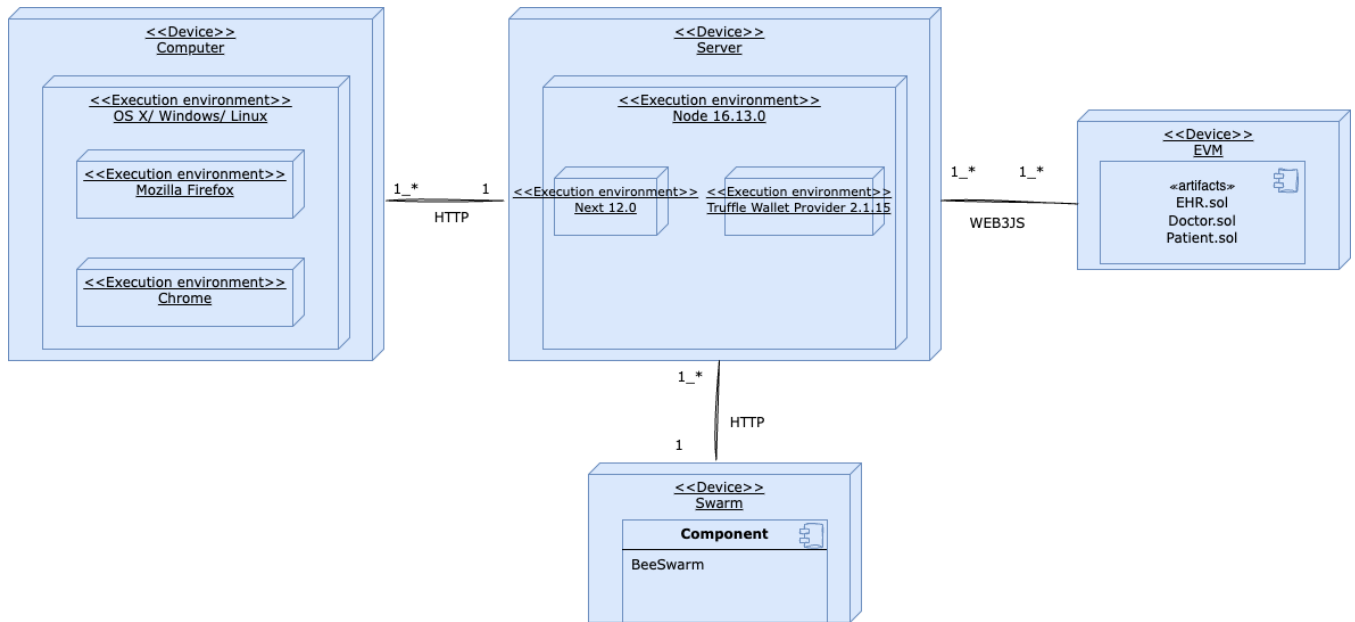


Imagen 3.3 Diagrama de despliegue

Dentro de uno de estos componentes se creó `FileUploadComponent`, que maneja la carga de archivos, su almacenamiento en Swarm, y la actualización del contrato inteligente (SC) con la referencia del archivo. Esta integración asegura que los archivos médicos se suban directamente a la red Swarm desde la interfaz del usuario, proporcionando una solución segura y eficiente para la gestión de datos médicos.

La integración con MetaMask se implementó mediante un contexto React, permitiendo que la aplicación maneje la autenticación y las transacciones del usuario de manera segura y eficiente. Desde el frontend, se instancia el contrato inteligente utilizando `web3.js`, lo que permite a los usuarios interactuar con el contrato EHR para registrar doctores y pacientes, así como gestionar archivos médicos. Este enfoque asegura una experiencia de usuario fluida y segura al interactuar con el blockchain.

3.3 Solución de almacenamiento descentralizado

El uso de Swarm para el almacenamiento descentralizado asegura que los archivos médicos sean accesibles y seguros sin depender de un servidor centralizado. La API BeeSwarm se integra en la plataforma para permitir a los pacientes subir archivos directamente desde la interfaz del usuario, almacenándolos en la red Swarm. Esta solución no solo mejora la seguridad y la privacidad de los datos médicos, sino que también reduce los costos operativos asociados al almacenamiento de grandes volúmenes de datos en sistemas centralizados tradicionales.

3.4 Flujo del sistema

Tras mencionar algunas de las características y funcionalidades y características del sistema, se muestra un diagrama de flujo el cual describe la interacción de los diferentes usuarios del sistema y el camino lleva para realizar diferentes acciones.

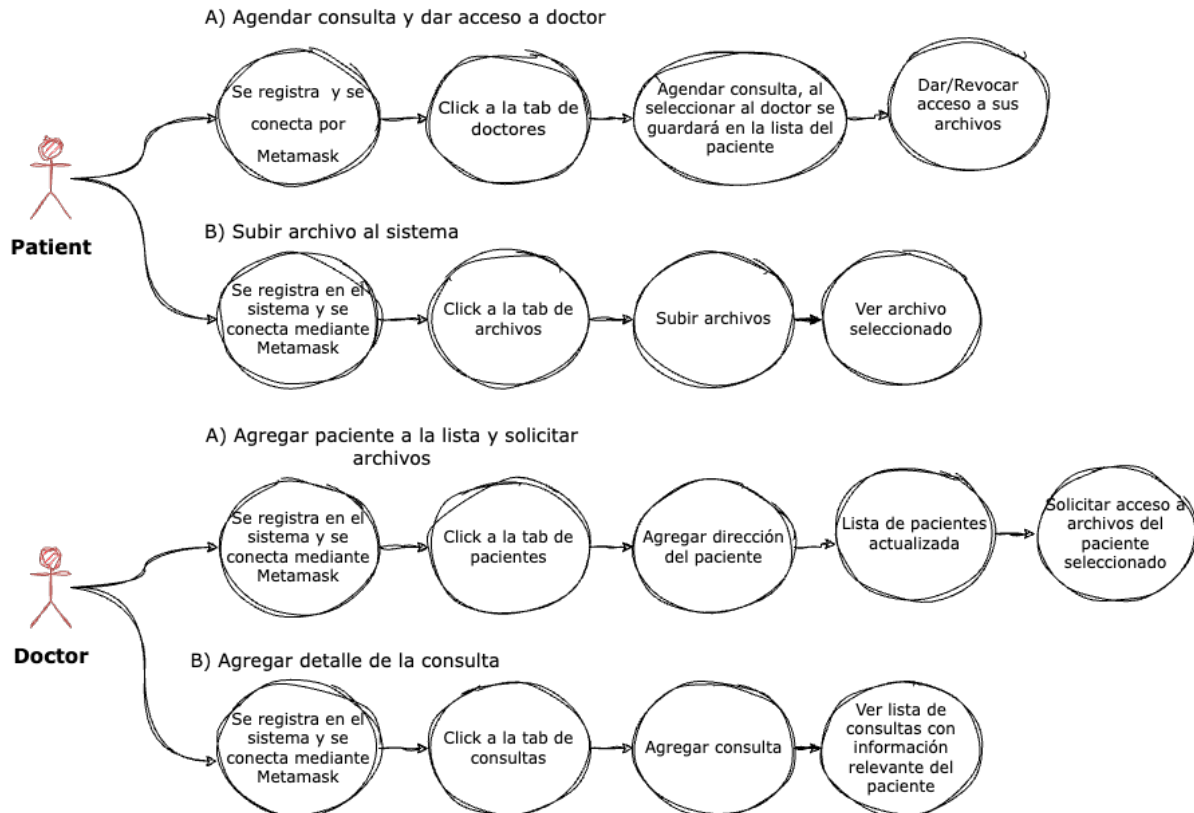


Imagen 3.4 Flujo del sistema

Capítulo 4

Metodología de Evaluación o Experimento

En este capítulo se describe la metodología seleccionada para asegurar el cumplimiento de los objetivos propuestos en esta investigación. Las técnicas empleadas para evaluar el sistema desarrollado, al igual que las métricas necesarias para determinar la solución al problema propuesto.

1.1 Evaluación del rendimiento y análisis práctico

Para evaluar el rendimiento de la solución propuesta, se llevará a cabo una serie de pruebas, las cuales serán evaluadas a través de una máquina con procesador M2 y 16 GB de RAM. Estas pruebas están diseñadas para medir el tiempo de ejecución, el costo de gas y la eficiencia en la realización de varias funciones críticas dentro del sistema blockchain.

En el sistema propuesto, definimos el costo de las transacciones reales y el tiempo necesario para ejecutar cada transacción. El costo se calcula por $\text{ether} = \text{gas usado} \times \text{precio del gas}$; "gas usado" significa el costo computacional constante, y "precio del gas" en wei de

la cantidad que se requiere para llamar a la función. La red ajusta el precio del gas para compensar los cambios en el valor del ether. De este modo, el costo total de las transacciones (en ether) para la accesibilidad de los datos de salud permanece relativamente constante.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se describe los resultado obtenidos a partir de la metodología mencionada previamente para asegurar una reducción de costos y una comparación directa el sistema diseñado en la obra literaria “Generic Patient-Centered Blockchain-Based EHR Management System” . Se realizarán las gráficas de rendimiento a partir de la librería Numpy y utilizando JupiterNotebooks como traductor.

5.1 Costos

A continuación, se presenta una tabla resumen del tiempo y costo de las operaciones realizadas en el Smart Contract (SC) comparando los resultados obtenidos en esta tesina con los del sistema descrito en la literatura.

Nombre de la función	Usuario	Tiempo	Gas Usado	Costo Total (SepoliaETH)
addDoctor ()	Admin	10.316 s	44,721	0.00089442 SepoliaETH
registerPatient()	Patient	13.669 s	148,329	0.00296658 SepoliaETH
addFilesFromPatient()	Patient	12.506 s	168,010	0.0033602 SepoliaETH

Tabla 5.1 Costos al llamar a las funciones según el paper[8]

Nombre de la función	Usuario	Tiempo	Gas Usado	Costo Total (SepoliaETH)
registerDoctor()	Doctor	7.33 s	180,978	0.00271102 SepoliaETH
registerPatient()	Patient	10.87 s	176,143	0.00245569 SepoliaETH
addFilesFromPatient()	Patient	13.70 s	183,691	0.002673 SepoliaETH

Tabla 5.2 Costos al llamar a las funciones desde el sistema MediHealth

5.2 Observaciones de las Gráficas

Comparando los tiempos de ejecución como se muestran en la imagen 5.3, se puede observar que las funciones implementadas en esta tesina tienen tiempos de ejecución menores o comparables a las funciones del sistema descrito en la literatura. Esto indica que la optimización realizada en las funciones de MediHeart son efectivas en términos de tiempos de respuesta.

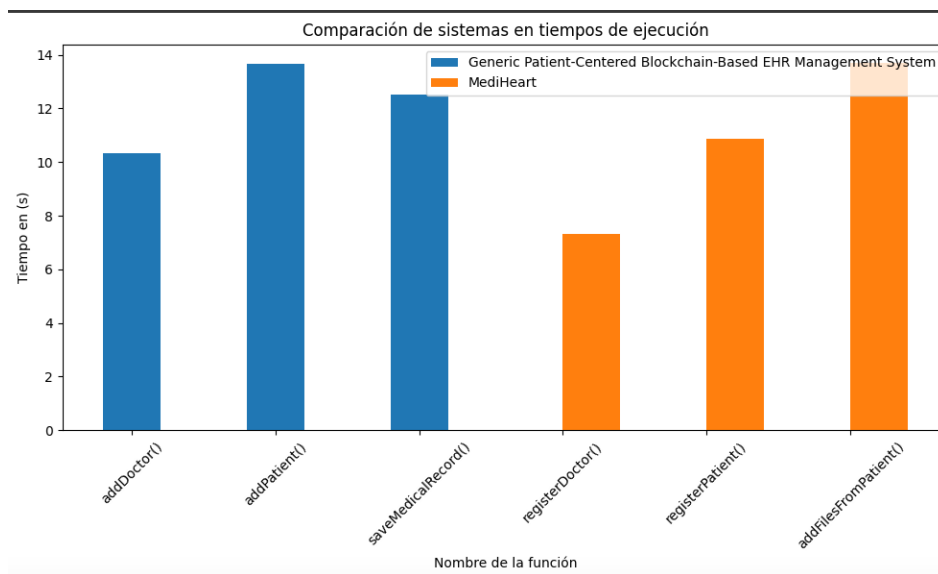


Imagen 5.3 Gráfica de tiempos de ejecución

En cuanto al gas usado, las funciones implementadas en esta tesina utilizan más gas en comparación con el sistema de referencia [8]. Esto se debe a una mayor complejidad de los datos procesados y la cantidad de información manejada en cada transacción.

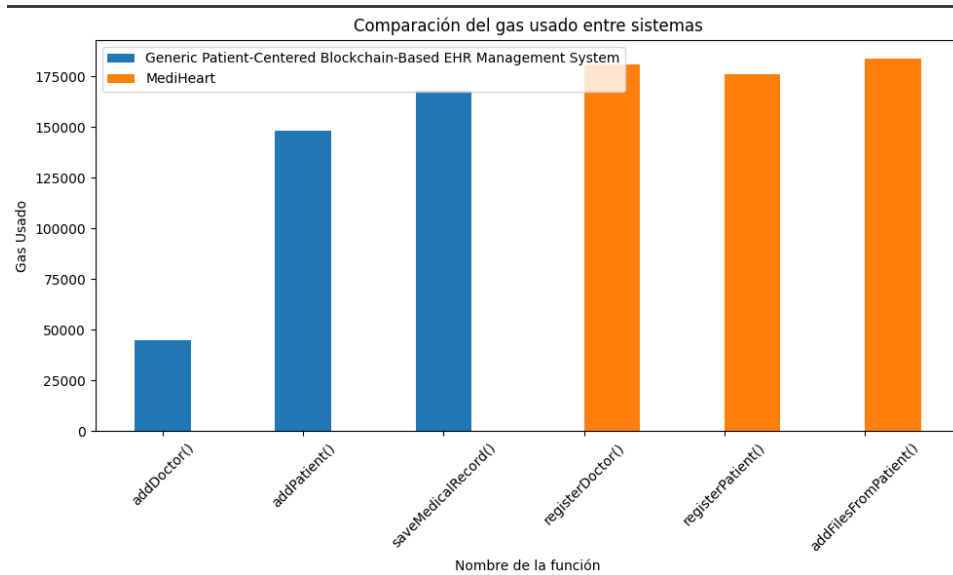


Imagen 5.4 Gráfica de gas utilizado en ambos sistemas

Por último pero no menos importante, aunque las funciones de la tesina tienen un costo ligeramente mayor en términos de SepoliaETH, estos costos siguen siendo competitivos y razonables en comparación con los costos del sistema de referencia. Esta diferencia de costos puede ser mitigada a través de optimizaciones adicionales en las funciones de manejo de datos.

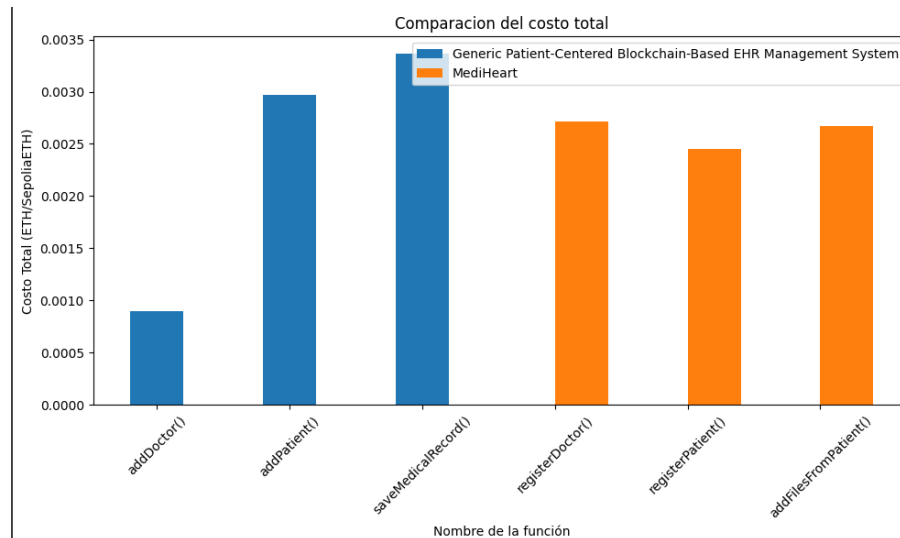


Imagen 5.5 Gráfica de costo total en ambos sistemas

5.3 Discusión

Los resultados muestran que el costo de gas para las funciones varía ligeramente, lo cual puede ser atribuido a la diferencia en la cantidad y tipo de datos procesados por cada función. Sin embargo, estos costos son considerablemente más bajos que los asociados con la compra de espacio de almacenamiento de un tercero o el mantenimiento de una base de datos a través de un sistema centralizado.

En general, el costo de operaciones en el SC puede reducirse aún más manteniendo el tamaño de los datos de entrada al mínimo. Sin embargo, incluso estos costos son inferiores a los asociados con sistemas alternativos como ISN, MedBlock, MeDShare, y MedChain [8].

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

La implementación de un sistema de registros electrónicos personales de salud (EPHR) utilizando tecnología blockchain ha demostrado ser una solución efectiva para mejorar la seguridad, privacidad y control de los datos de salud de los pacientes. Este enfoque aborda problemas críticos de los sistemas tradicionales, como la centralización de datos y la falta de interoperabilidad. Durante el desarrollo del proyecto, se utilizaron tecnologías como Next.js para crear una interfaz de usuario moderna y reactiva, lo cual presentó ciertos desafíos técnicos que fueron superados con soluciones creativas.

La descentralización y criptografía inherentes a blockchain garantizan la seguridad de los datos, previniendo fraudes y accesos no autorizados. El sistema permite a los pacientes controlar quién puede acceder a sus registros médicos, promoviendo la transparencia. Además, la integración de diferentes fuentes de datos en una plataforma unificada facilita el intercambio de información entre proveedores de salud, mejorando la continuidad del cuidado. Aunque el costo de las transacciones en blockchain puede ser una preocupación, la eliminación de intermediarios y la mejora en la eficiencia operativa pueden resultar en ahorros significativos a largo plazo.

No obstante, la implementación de blockchain en el sector salud de México enfrenta desafíos regulatorios y de infraestructura. La falta de estándares universales y la dificultad para cumplir con regulaciones como el GDPR representan barreras significativas.

6.1 Trabajo futuro

A pesar de los avances logrados, hay varias áreas para mejorar y expandir este trabajo. Una dirección futura es ampliar la base de datos con más pacientes y tipos de datos, incluyendo aquellos provenientes de dispositivos IoT, para asegurar que el sistema pueda adaptarse a una mayor variedad de casos y condiciones médicas.

Para hacer que el sistema sea más accesible y fácil de usar, se debe seguir mejorando la interfaz de usuario, incluyendo el desarrollo de aplicaciones móviles. Además, es importante seguir explorando formas de reducir los costos de transacción en blockchain.

En términos regulatorios, es esencial asegurar que el sistema cumpla con los estándares internacionales de salud y desarrollar marcos legales claros en México para facilitar la adopción de blockchain. Realizar pruebas y validaciones extensivas en entornos reales permitirá evaluar el rendimiento, la seguridad y la usabilidad del sistema en diversas condiciones.

Finalmente, es importante cerrar la brecha entre la teoría y la práctica en la implementación de blockchain. Esto implica llevar a cabo investigaciones aplicadas y desarrollar soluciones prácticas que puedan ser implementadas en el sector salud. Estas direcciones futuras no solo mejorarán la efectividad del sistema EPHR desarrollado, sino que también contribuirán significativamente a la evolución de la gestión de datos de salud a través de tecnologías emergentes como blockchain.

Bibliografía:

1. [1] M. Rajput, V. Kumar, and S. A. Memon, "Healthcare 4.0: recent advancements and futuristic research directions," *Healthcare Technology Letters*, vol. 8, no. 7, pp. 437-444, 2021. Available: [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9795952/>
2. [2] D. Medel, A. M. Cordero, and A. Fernández-Medina, "Digital transformation in the healthcare sector through blockchain technology. Insights from academic research and business developments," *Computers & Security*, vol. 106, p. 102458, 2021. Available: [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016649722100167X?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=85b938d15a2bb6e1
3. [3] J. Xu, X. Hu, and Y. Deng, "Blockchain's coming to hospital to digitalize healthcare services: Designing a distributed electronic health record ecosystem," *Computers in Industry*, vol. 131, p. 103487, 2022. Available: [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016649722200027X?via=ihub>
4. [4] J. F. Smith and K. Johnson, "PatientDataChain: A Blockchain-Based Approach to Integrate Personal Health Records," *Sensors*, vol. 20, no. 22, p. 6538, 2020. Available: [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/22/6538>
5. [5] S. Kim et al., "Blockchain Personal Health Records: Systematic Review," *Journal of Medical Internet Research*, vol. 23, no. 4, p. e25094, 2021. Available: [Online]. Available: <https://www.jmir.org/2021/4/e25094>
6. [6] A. Sharma et al., "Analyzing the performance of a blockchain-based personal health record implementation," *Telematics and Informatics*, vol. 49, p. 101506, 2020. Available: [Online]. Available:

[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1532046419300589?
ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=85b93fcccc0b6e1](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1532046419300589?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=85b93fcccc0b6e1)

7. [7] K. Jones and M. Brown, "How blockchain will transform the healthcare ecosystem," Biomedical Signal Processing and Control, vol. 69, p. 102919, 2021. Available: [Online]. Available: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681321000215?
via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681321000215?via%3Dihub)
8. [8] P. García-Morón et al., "Generic Patient-Centered Blockchain-Based EHR Management System," Applied Sciences, vol. 13, no. 3, p. 1761, 2023. Available: [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/3/1761>