



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación

y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Doctorado

**Modelo para la gestión descentralizada de datos en sistemas de
alumbrado público teledirigido mediante la implementación de
IPFS, LZ4 y blockchain**

Presenta

Mtro. René García Reyes

como requisito para la obtención del grado de

Doctor en Ciencias de la Computación

Director de tesis

Dr. Javier Ortiz Hernández

Codirector de Tesis

Dr. Rito Mijarez Castro

 Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico	ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEL DOCUMENTO DE TESIS DOCTORAL		Código: CENIDET-AC-006-D20
	Referencia a la Norma ISO 9001:2008 7.1, 7.2.1, 7.5.1, 7.6, 8.1, 8.2.4		Revisión: 0
			Página 1 de 1

Cuernavaca, Mor., a 19 de agosto de 2025

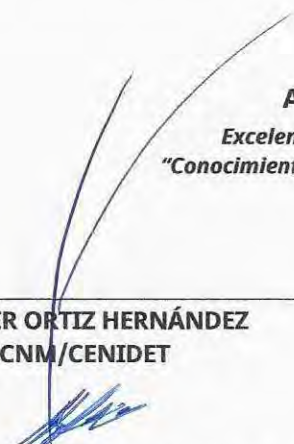
DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
P R E S E N T E

AT'n: DR. JUAN GABRIEL GONZÁLEZ SERNA
PRESIDENTE DEL CLAUSTRO DOCTORAL DEL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES

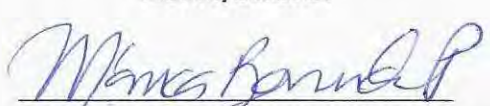
Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del estudiante **M.C. RENÉ GARCÍA REYES** manifiestan que después de haber revisado el documento de tesis titulado **"Modelo para la gestión descentralizada de datos en sistemas de alumbrado público teledirigido mediante la implementación de IPFS, LZ4 y blockchain"**, realizado bajo la dirección del **Dr. Javier Ortiz Hernández** y codirección del **Dr. Rito Mijarez Castro**, el trabajo se ACEPTA para proceder a su impresión.

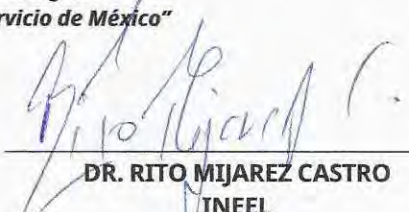
ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

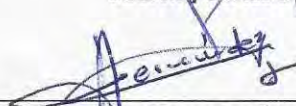

DR. JAVIER ORTIZ HERNÁNDEZ
TECNM/CENIDET


DR. HUGO ESTRADA ESQUIVEL
TECNM/CENIDET


DRA. MONICA BORUNDA PACHECHO
SECIHTI/ CENIDET


DR. RITO MIJAREZ CASTRO
INEEL


DRA. MARÍA YASMÍN HERNÁNDEZ PÉREZ
TECNM/CENIDET


DR. JOSÉ ALBERTO HERNÁNDEZ AGUILAR
UAEM

c.c.p: C Verónica Sotelo Boyas/ Jefa del Departamento de Servicios Escolares
c.c.p: C Née Alejandro Castro Sánchez / Jefe del Departamento de Ciencias Computacionales
c.c.p: Expediente



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 25/agosto/2025

Oficio No. SAC/210/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

RENÉ GARCÍA REYES
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Modelo para la gestión descentralizada de datos en sistemas de alumbrado público telemedido mediante la implementación de IPFS, LZ4 y blockchain"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

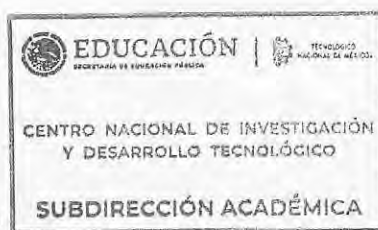
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ciencias Computacionales
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



Agradecimientos

Quiero agradecer a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado a través de la beca doctoral. Este respaldo no solo hizo posible la realización de mis estudios, sino que también representó una motivación constante para seguir adelante, incluso en tiempos complejos para la ciencia y la educación.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) campus Cuernavaca por ofrecer un espacio abierto al aprendizaje, la colaboración y la reflexión. Haber contado con sus recursos y su comunidad académica y científica fue clave esencial para dar forma a esta investigación y logro.

Al Dr. Javier Ortiz Hernández, director de esta tesis, quiero expresarle mi más profundo agradecimiento por haber confiado en mí desde el principio. Usted no solo me reclutó, sino que me entrenó con paciencia, rigor y una entrega admirable. Es un gran mentor y un guía incondicional que supo motivarme en los momentos de incertidumbre. Su confianza y apoyo fueron la base que sostuvo cada paso de esta investigación. No encuentro palabras suficientes para agradecer el privilegio de haber aprendido de usted, siempre le estaré agradecido.

Al Dr. Rito Mijarez Castro, codirector, le agradezco sinceramente no solo su guía académica, sino su amistad, su confianza y su manera tan clara de mostrarme cuándo podía dar más. Sus pláticas, sus consejos y su forma de ver el mundo me hicieron pensar distinto, salir de la zona cómoda y crecer. Siempre compartió su experiencia con generosidad, y en los momentos en que más lo necesité, su claridad me ayudó a volver al centro. Este agradecimiento también lo extiendo a mis compañeros del INEEL que me brindaron su apoyo en el trabajo con los sistemas AMI, gracias por su tiempo, su disposición y por ayudarme a conectar la teoría con la realidad técnica. Su colaboración fue clave en momentos importantes de esta investigación.

A la Dra. María Yasmín Hernández Pérez, le agradezco profundamente su participación como integrante del comité, así como la atención y el cuidado con los que siempre oriento cada parte de este trabajo. Sus observaciones fueron siempre claras, precisas y constructivas, y estuvieron guiadas siempre con la mejora continua. Más allá de su rigor académico, agradezco el respeto, la amabilidad, su profesionalismo, pero sobre todo la calidad humana con la que siempre me acompañó.

Al Dr. Hugo Estrada Esquivel, le expreso mi gratitud por su participación y por sus comentarios siempre pertinentes y equilibrados. Su gran experiencia en el área aportó calidad al trabajo, y su apoyo fue constante a lo largo de este proceso.

Al Dr. José Alberto Hernández Aguilar, miembro del comité, mi gratitud va mucho más allá del ámbito académico. Su acompañamiento constante, su paciencia y su disposición para escuchar fueron fundamentales en los momentos en que más lo necesitaba. Gracias por compartir no solo su experiencia, sino también su calidez humana, por sus consejos sinceros y por estar presente con generosidad y cercanía. Su compañía fue un apoyo verdadero, y su guía, un regalo que valoro profundamente.

A la Dra. Mónica Borunda Pacheco, le agradezco por integrarse con disposición y entusiasmo al comité. Su experiencia en el área aportó una perspectiva especializada que enriqueció el análisis técnico del trabajo, incluso en las etapas finales.

Al Dr. Joaquín Pérez Ortega, le agradezco sinceramente su alta exigencia, crítica, su rigurosidad y su compromiso con la excelencia. Su participación fue esencial para fortalecer el enfoque y el contenido de esta tesis. Su firmeza fue siempre un impulso para mejorar.

Dedicatoria

A mis padres, Ma. del Refugio Reyes Perrusquía y René García Santiago. Este logro es profundamente de ustedes. Porque fueron quienes me sostuvieron cuando todo flaqueaba, quienes nunca dejaron que me cayera del todo. Su amor, su ejemplo de lucha diaria y su presencia constante han sido el pilar más firme de mi vida. Los admiro con todo mi corazón por la forma en que han enfrentado cada obstáculo, y por haber hecho tanto, incluso en silencio, para que yo pudiera estar aquí. Gracias por no soltarme nunca, por darme fuerza incluso cuando ya no me quedaba, y por enseñarme que avanzar, a veces, también es resistir. Este logro es más de ustedes que mío.

A mi esposa, Iliana, por estar en este camino y compartir conmigo esta etapa y a mi hijo René Alexander, eres la fuerza que me sostuvo en los días difíciles. Tu alegría y energía iluminaron mis momentos más difíciles y me dieron la motivación para seguir adelante. Este logro es también tuyo, porque cada esfuerzo fue pensando en brindarte un mejor futuro.

A mis suegros, Martha Guadalupe Bahena Rivera y Oscar Gerardo Delgado de León. Les expreso mi más sincero agradecimiento por el apoyo constante y desinteresado que nos brindaron durante todo este proceso. Su respaldo y confianza fueron fundamentales para que pudiéramos avanzar con tranquilidad y dedicación. Gracias por estar siempre presentes y ser parte importante de este logro.

Al Dr. Sergio Levin Kosberg, amigo y maestro, le doy las gracias desde lo más profundo de mi corazón por ser un guía y amigo de muchos años y sobre todo por ser el primero de todos en alentarme a tomar este camino y reto. Su insistencia, su confianza y su apoyo incondicional fueron decisivos para que esta meta fuera posible, aun cuando muchas veces quise darme por vencido. Siempre le estaré agradecido toda la vida.

A mi hermana Nathaly García Reyes, Scott McPhee, mis primos Alfonso Soni Reyes, Alain Reyes Pérez.

A mis tíos Ernesto y Eleazar García y toda mi familia Reyes Perrusquía.

A mis amigos Manuel Martínez Fernández, Diana Jiménez, Eduardo Espinosa, Jesús Villegas, Alejandro Organista, Anuar Bojaril, Margarito Vargas.

Gracias por estar siempre ahí, por las charlas, las risas, consejos, asesorías, las llamadas y el apoyo en los momentos en que más lo necesité. Cada palabra, cada encuentro y cada gesto hicieron que este camino fuera mucho más llevadero, más claro y más alegre. No habría sido igual sin ustedes.

A Juan Antonio, Eduardo Sánchez, Sandra Magali, Ángel Daza, Manuel Erazo, Juan Flores les expreso mi más sincero agradecimiento por haber compartido esta etapa de formación conmigo. Fueron compañeros que, con el tiempo, se convirtieron en grandes amigos. Gracias por cada plática interminable, por cada broma (incluso cuando eran a mi costa), por escucharme cuando todo parecía ir mal, y por ayudarme a seguir adelante a su manera: entre risas, ideas, críticas y muchas veces, una copa en la mano. Su presencia hizo de este camino algo más ligero, más humano y definitivamente más memorable. Gracias por estar.

A la memoria de mi Abu Chelita, Abu Lupita y mi amiga Paty, cuyo cariño y ejemplo hacen que este logro también les pertenezca.

Gracias

Resumen

El presente trabajo desarrolla un modelo descentralizado para la gestión de datos en sistemas de alumbrado público teledirigido, basado en la integración de tecnologías de compresión LZ4, almacenamiento distribuido mediante IPFS y registro en blockchain. El objetivo principal es garantizar la eficiencia, seguridad, integridad y trazabilidad de la información proveniente de infraestructuras de medición avanzada (AMI) e IoT, reduciendo la dependencia de servidores centralizados y fortaleciendo la resiliencia frente a ciberataques y pérdidas de datos.

La metodología empleada se fundamenta en un proceso de búsqueda sistemática de la literatura bajo el estándar PRISMA, que permitió identificar y clasificar investigaciones relevantes en cinco áreas: algoritmos de compresión, alumbrado público, AMI/IoT, blockchain en sistemas energéticos, y aplicaciones conjuntas de IPFS y blockchain. A partir de esta revisión, se diseñó un modelo compuesto por módulos para validación de datos, compresión sin pérdida con LZ4, almacenamiento en IPFS y registro de identificadores de contenido (CID) en blockchain mediante contratos inteligentes.

La validación del sistema se realizó a través de pruebas con datos reales de medidores AMI en un entorno simulado de alumbrado público. Se evaluaron métricas de desempeño como el tiempo de procesamiento, ratio de compresión, latencia de acceso distribuido, costo y tiempo de registro en blockchain, así como la verificación de integridad de los datos. Los resultados demostraron una reducción superior al 80 % en el tamaño de los archivos sin pérdida de información, un tiempo de procesamiento menor a tres minutos por cada ciclo de captura/registro y una tasa de éxito del 100 % en la verificación de integridad mediante hash de CID.

Este modelo representa una aportación significativa para la gestión segura y eficiente de datos en infraestructuras críticas, al combinar mecanismos de optimización de almacenamiento con esquemas de descentralización y trazabilidad inmutable. Su aplicabilidad se proyecta no solo en alumbrado público, sino en otros dominios energéticos y de servicios urbanos que requieren soluciones robustas y confiables para la administración de datos masivos.

Palabras clave: alumbrado público, Internet de las cosas (IoT), Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), blockchain, ciberseguridad, gestión descentralizada de datos, IP.

Abstract

This work develops a decentralized model for data management in smart metered public lighting systems, based on the integration of LZ4 compression, distributed storage through IPFS, and blockchain registration. The main objective is to ensure efficiency, security, integrity, and traceability of information generated by Advanced Metering Infrastructure (AMI) and IoT, while reducing dependence on centralized servers and strengthening resilience against cyberattacks and data loss.

The methodology was supported by a systematic literature review following the PRISMA framework, which allowed the identification and classification of relevant studies into five categories: compression algorithms, public lighting, AMI/IoT, blockchain in energy systems, and combined applications of IPFS and blockchain. From this review, a model was designed and structured into modules for data validation, lossless compression with LZ4, storage in IPFS, and registration of content identifiers (CID) in blockchain through smart contracts.

The validation of the system was carried out with real AMI datasets in a simulated public lighting environment. Performance metrics such as processing time, compression ratio, distributed access latency, blockchain registration costs and delays, as well as data integrity verification, were assessed. The results showed more than 80% reduction in file size without data loss, processing times under three minutes per capture/registration cycle, and a 100% success rate in verifying data integrity through CID hashing.

This model represents a significant contribution to secure and efficient data management in critical infrastructures, combining optimization mechanisms with decentralization and immutable traceability. Its applicability extends not only to public lighting but also to other energy and urban service domains that require robust and reliable solutions for massive data management.

Keywords: public lighting, Internet of Things (IoT), Advanced Metering Infrastructure (AMI), blockchain, cybersecurity, decentralized data management, IPFS, LZ4.

Tabla de contenido

Página

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2 MOTIVACIÓN	5
1.3 RELEVANCIA DEL ESTUDIO	5
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.5 LIMITACIONES DE LAS SOLUCIONES ACTUALES	7
1.6 NECESIDAD DE UN MODELO DESCENTRALIZADO PARA LA GESTIÓN DE DATOS	7
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS Y CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA	11
2.1 OBJETIVO GENERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2.3 CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA	12
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	14
3.1 MARCO TEÓRICO	15
3.1.1 TELEMEDICIÓN EN SISTEMAS AMI	15
3.1.2 DESCENTRALIZACIÓN	15
3.1.3 IPFS (INTERPLANETARY FILE SYSTEM)	15
3.1.4 SEGURIDAD Y PRIVACIDAD DE LOS DATOS	16
3.1.5 CONTRATOS INTELIGENTES	16
CAPÍTULO 4: ESTADO DEL ARTE	19
4.1 METODOLOGÍA PARA REVISIÓN DE LA LITERATURA	20
4.2 ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA EN BASES DE DATOS	20
4.3 INCLUSIÓN DE FUENTES ADICIONALES	22
4.4 ELIMINACIÓN DE DUPLICADOS	22
4.5 CRIBADO INICIAL (SCREENING)	23
4.6 EVALUACIÓN DE ELEGIBILIDAD	23
4.7 INCLUSIÓN FINAL DE ESTUDIOS	23
4.8 DIAGRAMA DE FLUJO PRISMA	24
4.9 TABLA DEL ESTADO DEL ARTE	25
4.9.1 ESTADO DE LA PRÁCTICA	60
CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA	65
5.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	66
5.2 DISEÑO DEL MODELO	68
5.2.1 ARQUITECTURA Y DESARROLLO DEL MODELO	71
5.3 INTEGRACIÓN HARDWARE-SOFTWARE	77
5.4 PRUEBAS Y VALIDACIÓN	85
5.5 VENTAJAS Y LIMITACIONES TÉCNICAS	86
CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	88
6.1 RESULTADOS CUANTITATIVOS	90
6.2 EVALUACIÓN DEL MODELO	93

6.3 EFICIENCIA EN LA COMPRESIÓN DE DATOS	94
6.3.1 REDUCCIÓN DE COSTOS DE ALMACENAMIENTO EN BLOCKCHAIN	96
6.3.2 CONSUMO DE GAS ESTIMADO	97
6.3.3 SEGURIDAD E INTEGRIDAD DE LOS DATOS	98
6.3.4 TIEMPOS DE RESPUESTA DEL SISTEMA	98
6.4 COMPARACIÓN CON ENFOQUES TRADICIONALES	99
6.5 LIMITACIONES DEL ESTUDIO	102
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	104
7.1 CONCLUSIONES.....	105
7.2 TRABAJOS FUTUROS.....	106
7.3 PUBLICACIONES	107
GLOSARIO.....	109
REFERENCIAS	115

Lista de figuras

FIGURA 4.1. PALABRAS CLAVE EN ESPAÑOL.....	21
FIGURA 4.2. PALABRAS CLAVE EN INGLÉS	22
FIGURA 4.3. DIAGRAMA DE FLUJO PRISMA.	25
FIGURA 4.4: INVESTIGACIÓN EN CONTROL DE ENERGÍA PARA ILUMINACIÓN EXTERIOR, ANDRZEJ OADOWICZ & JAKUB GRELA. 2016..	29
FIGURA 4.5. EJEMPLO DE MEDICIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA PARA LA SECCIÓN SELECCIONADA (JANIGA P., GAŠPAROVSKÝ, D. 2012).	30
FIGURA 4.6. REPRESENTACIÓN DEL SETM (HOON KO,2021).....	34
FIGURA 4.7. ARQUITECTURA DE ENERGÍA LOCAL DE COMUNIDAD ADMINISTRADA (LEC) (MARCO GALICI, 2021).	35
FIGURA 4.8. ESTRUCTURA GENERAL DE LAS TRANSACCIONES DE ELECTRICIDAD EN MICRORREDES POR MEDIO DE BLOCKCHAIN (JIAN WANG, 2017).	35
FIGURA 4.9. ESTUDIO SOBRE LA MEJORA DEL RENDIMIENTO DE LA SEGURIDAD DE LAS REDES INTELIGENTES Y LA PERSPECTIVA DE LAS REDES INTELIGENTES DE BLOCKCHAIN (SEONG-KYU KIM, 2018).	36
FIGURA 4.10. APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN EN SISTEMAS ENERGÉTICOS SOSTENIBLES: UNA VISIÓN GENERAL (JIANI WU, 2018).	36
FIGURA 4.11. CONSTRUYENDO UNA COMUNIDAD DE USUARIOS PARA LA ENERGÍA DE MERCADO ABIERTO, (JOAO C. FERREIRA, 2018).	37
FIGURA 4.12. PROTECCIÓN DEL INTERCAMBIO DE DATOS BASADA EN BLOCKCHAIN EN UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA CONSIDERANDO LA GESTIÓN DE LA CONGESTIÓN Y EL BIENESTAR SOCIAL (MOSLEM DEHGHANI, 2020).	38
FIGURA 4.13. UN SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA OPTIMIZADO Y DESCENTRALIZADO PARA CIUDADES INTELIGENTES (AYUDE SWAIN, 2021).	39
FIGURA 4.14. LA PLATAFORMA DE COMERCIO DE ENERGÍA DE BROOKLYN (OKOYE ET AL., 2017).	40
FIGURA 4.15. MICRORRED: TRANSACCIONES INTELIGENTES EN BLOCKCHAIN (OKOYE ET AL., 2017).	40
FIGURA 4.16. MODELO DE TRANSACCIÓN BLOCKCHAIN DE PERMISO PARCIAL DE MICRORRED (OKOYE ET AL., 2017).	41
FIGURA 4.18. MODELO DE TRANSACCIÓN BLOCKCHAIN DE PERMISO PARCIAL DE MICRORRED (OKOYE ET AL., 2017).	42
FIGURA 4.18. OTORGAR PRIORIDAD A LOS USUARIOS EN LA COMPRA DE ELECTRICIDAD (ZHANG ET AL., 2021).	46
FIGURA 4.19. MUESTRA LA DIFERENCIA ENTRE LA FORMA TRADICIONAL DE COMERCIALIZACIÓN DE ENERGÍA Y LA COMERCIALIZACIÓN DE ENERGÍA DESCENTRALIZADA, BASADA EN KORKMAZ ET AL., 2021.	47
FIGURA 4.20. CONTRATOS TRADICIONALES Y CONTRATOS INTELIGENTES (KORKMAZ ET AL., 2021)	51
FIGURA 4.21. COMO UN SE CREA EL CONTRATO INTELIGENTE (KORKMAZ ET AL., 2021).	54
FIGURA 4.22. EJEMPLO DE LOS CONTRATOS INTELIGENTES QUE SE PRODUCEN EN SOLIDITY UTILIZANDO LA PREDEFINIDA CONSIGNA "CONTRATO" (KORKMAZ ET AL., 2021).	55

FIGURA 4.23. DIAGRAMAS DE FLUJO DE FUNCIONES DE CONTRATOS INTELIGENTES DE ENERGÍA (KORKMAZ ET AL., 2021).	57
FIGURA 4.24. MODELO D3A, ELABORACIÓN PROPIA BASADA EN (BRONSKI, P.ET AL 2018).	63
CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA.....	65
FIGURA 5.1 DIAGRAMA GENERAL DEL MODELO, ELABORACIÓN PROPIA.	70
FIGURA 5.2. DIAGRAMA MÓDULO 1, ELABORACIÓN PROPIA	71
FIGURA 5.3. DIAGRAMA MÓDULO 2, ELABORACIÓN PROPIA	72
FIGURA 5.4. DIAGRAMA MÓDULO 3, ELABORACIÓN PROPIA.	73
FIGURA 5.5. DIAGRAMA MÓDULO 4, ELABORACIÓN PROPIA.	74
FIGURA 5.6. DIAGRAMA MÓDULO 5, ELABORACIÓN PROPIA.	75
FIGURA 5.7. DIAGRAMA MÓDULO 6, ELABORACIÓN PROPIA.	76
FIGURA 5.8. DIAGRAMA DE INTEGRACIÓN HARDWARE-SOFTWARE.	77
FIGURA 5.9. MEDIDORES AMI/ARM PROPIEDAD DEL INEEL.	78
FIGURA 5.10. ESTRUCTURA DE ARCHIVOS AMI/IOT, PROPIEDAD DE INEEL.....	79
FIGURA 5.11. ESTRUCTURA DE ARCHIVOS GENERADA CON EL ALGORITMO DE COMPRESIÓN LZ4 APLICADO.	80
FIGURA 5.12. COMPARACIÓN DE LA COMPRESIÓN, TRANSFERENCIA, Y NIVELES DE DESCOMPRESIÓN CON EL ALGORITMO LZ4 (LZ4, 2024).	80
FIGURA 5.13. VISTA DE ARCHIVOS CARGADOS EN EL IPFS YA CON EL ALGORITMO DE COMPRESIÓN LZ4 APLICADO.	82
FIGURA 5.14. CID (CONTENT IDENTIFIER) GENERADO EN EL IPFS.....	83
FIGURA 5.15. MODELO PROPUESTO CON SUS COMPONENTES.	84

Lista de tablas

TABLA 4.1. TABLA DEL ESTADO DEL ARTE.....	27
TABLA 4.2. ELABORACIÓN PROPIA BASADA EN A. ELSAGHEER MOHAMED, 2013.....	33
TABLA 4.3. ELABORACIÓN PROPIA BASADA EN SAMIR A. ELSAGHEER MOHAMED, 2013.	34
TABLA 4.4. TABLA DEL ESTADO DE LA PRÁCTICA.	64
TABLA 5.1 CLASIFICACIÓN DE LAS TARIFAS DE ELECTRICIDAD EN MÉXICO POR CLIENTE, DEMANDA DE ENERGÍA Y MODELO DE MEDIDOR AMI/IOT ASOCIADO.	68
TABLA 6.1. TABLA DE RESULTADOS SIMULADOS POR COSTOS ACTUALIZADA AL MES DE FEBRERO 2025.	90
TABLA 6.2. TIEMPOS DE COMPRESIÓN DE ARCHIVOS, ELABORACIÓN PROPIA.....	95
TABLA 6.3. TIEMPOS DE DESCOMPRESIÓN DE ARCHIVOS, ELABORACIÓN PROPIA.....	96
TABLA 6.4. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS AMI GENERALES VS EL MODELO PROPUESTO.	101

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción

La principal contribución de este trabajo consiste en el desarrollo de un modelo innovador que aborda de manera integral los desafíos fundamentales relacionados con la seguridad, la integridad, la eficiencia y la privacidad en la gestión de datos generados por la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) y dispositivos IoT en redes eléctricas. Este modelo se aplica específicamente al contexto del alumbrado público en México, un componente esencial de la infraestructura urbana moderna. En un entorno donde la optimización del consumo energético y la mejora de la sostenibilidad son objetivos clave, la propuesta busca ofrecer una solución avanzada y descentralizada para la gestión de datos, garantizando su protección contra manipulaciones no autorizadas y mejorando la eficiencia operativa de los sistemas de alumbrado público. A través de la integración de tecnologías emergentes como la compresión de datos, el almacenamiento descentralizado y la tecnología blockchain (cadena de bloques), este modelo proporciona un enfoque robusto y escalable que no solo optimiza la gestión y protección de los datos, sino que también facilita la transparencia, la trazabilidad y la resiliencia en los sistemas de infraestructura crítica.

La iluminación en vialidades y espacios públicos es fundamental para garantizar la seguridad, prevenir accidentes y reducir actos delictivos. El alumbrado público cumple funciones estéticas y ornamentales, destacando edificios emblemáticos y decorando plazas y parques durante la noche. En la actualidad, el alumbrado público es un componente esencial para el desarrollo urbano de las ciudades modernas, facilitando que las personas realicen actividades nocturnas al permitirles transitar de forma segura hacia sus escuelas, trabajos, tiendas, o simplemente desplazarse en calles iluminadas.

Según los números, es un alto porcentaje del 40%, al 50% el del consumo de energía eléctrica al que están sometidos los gobiernos municipales. A lo que se enfrenta el problema desde un modelo en el que alternan distintas tecnologías. Tanto las convencionales como algunos de los nuevos equipos de alta eficiencia de bajo consumo, obteniendo un nivel de iluminación sobre los dispositivos eficientes. En muchos casos, la expectativa está en los relativamente bajos niveles de iluminación necesarios en espacios públicos, siendo el componente utilizado para obtener la estética pretendida con el menor gasto o la menor acción directa posterior. (LED POINT,2018).

Los operativos del alumbrado público del medio incluyen la electricidad y el mantenimiento de los equipos, elevados. Alcanza como máximo el 10% del gasto corriente municipal. En esta situación, el 2.25% del consumo de energía eléctrica del total del país, el equivalente a un gasto obligatorio para pagar a la Comisión Federal de Electricidad la cantidad aproximada de 15 000 millones de pesos. Algunos autores con más detalle apuntan que se trata de gastar mucho, que repercute en las arcas municipales, sobre las que no tienen poder ni autoridad en la gestión de las tarifas energéticas. (SIE, 2017).

A lo que hay que añadir que, según la empresa Fitch Ratings, la tarifa del servicio de alumbrado público es la segunda o más cara del país, solo superada por la de la industria, principal demandante de la energía eléctrica en el país. (Natalia Etienne et al., 2014).

Para enfrentar estos desafíos, en 2010 el gobierno federal lanzó el Proyecto Nacional de Eficiencia Energética en Alumbrado Público Municipal, promovido por la Secretaría de Energía (SENER) en colaboración con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) y el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS). Este proyecto tiene como objetivo promover la eficiencia energética mediante la sustitución de sistemas ineficientes de alumbrado público en municipios, ofreciendo apoyo técnico y financiero para implementar tecnologías que reduzcan el consumo energético y cumplan con las Normas Oficiales Mexicanas (Proyecto Nacional de Eficiencia Energética en Alumbrado Público Municipal, 2015).

A pesar de los avances en materia de infraestructura y modernización tecnológica, la gestión convencional de los sistemas de alumbrado público continúa enfrentando importantes desafíos estructurales y operativos. Entre los más relevantes se encuentra la ausencia de sistemas digitales integrados que permitan un seguimiento preciso y actualizado del inventario de luminarias. Esta carencia dificulta el control sobre el estado y ubicación de los equipos, lo que a su vez propicia errores o discrepancias en la medición del consumo energético. Otro desafío significativo es la falta de trazabilidad en la información registrada, lo cual deja margen para la manipulación de datos, ya sea por errores humanos o por intenciones maliciosas, impactando negativamente en la transparencia y en la eficiencia de la gestión pública. Estos factores, combinados con una limitada capacidad para auditar el uso energético en tiempo real, terminan por generar afectaciones económicas directas en las finanzas municipales y reducen la capacidad de planificación a mediano y largo plazo.

Considerando lo anterior, es necesario explorar opciones que no solo optimicen los trámites administrativos, sino también la transparencia, para poder generar confianza en la ciudadanía. Por ejemplo, se puede optar por implementar un sistema de data logging que asocie a cada punto de luz un dispositivo de georreferenciación que cuente con un sistema alterno de energización, además de herramientas que realicen hashing que permitan cifrar el registro inalterable de la prueba del funcionamiento. Adoptar la digitalización avanzada de procesos y la robótica para auditoría de inventarios podría ayudar en reducción de errores por proceso manual/papel, entre otros. También se puede emplear verificación mediante crowdsourcing que permita auditorías por tercera persona ajena y en tiempo real; de esta forma, también se contribuye a la transparencia en la administración de recursos públicos, promueve la rendición de cuentas y mejora la posibilidad de auditorías.

En este sentido, resulta necesario plantear modelos de gestión de datos que respeten y garanticen requisitos de reducción de costes, generación de audiencias, escalabilidad, pero también de seguridad, veracidad e interoperabilidad tecnológica. En este contexto, las tecnologías disruptivas permiten dar un giro de 180 grados a esta gestión. En concreto, los sistemas de compresión de alta eficiencia, los sistemas de almacenamiento distribuidos y los mecanismos criptográficos permiten adaptar el funcionamiento del sistema de iluminación público en clave descentralizada. Con este horizonte, se plantea un modelo donde se implementan algoritmos de compresión de datos Lempel-Ziv 4 (LZ4) como optimizadores de almacenamiento; el InterPlanetary File System (IPFS) como parte del almacenamiento distribuido, y un blockchain como estructura que mantiene la veracidad e integridad de la información. En suma, esta propuesta se presenta como un modelo innovador con el objetivo de contribuir a la gobernanza digital-municipal y como solución técnico-científica ante las dificultades planteadas.

El sistema de alumbrado público de una localidad está conformado por una red de componentes eléctricos e infraestructurales que permiten la iluminación de espacios urbanos y suburbanos. En términos técnicos, este sistema incluye luminarias (dispositivos que albergan las fuentes de luz), lámparas o focos (que pueden ser de diversas tecnologías como LED, vapor de sodio o halogenuros metálicos), balastros o drivers (que regulan el suministro eléctrico), postes o soportes estructurales y celdas fotoeléctricas o sensores que automatizan el encendido y apagado según las condiciones de luz ambiental. Además, los sistemas de alumbrado se integran mediante una red eléctrica de distribución, que puede ser aérea o subterránea, y están conectados a centros de carga o transformadores, que adecuan el voltaje necesario para su operación. En algunos casos, estos sistemas incluyen también gabinetes de control centralizado o dispositivos para el monitoreo remoto, lo cual permite la supervisión del estado operativo de las luminarias y facilita intervenciones técnicas más precisas.

Los sistemas convencionales de alumbrado público suelen estar basados en tecnologías propietarias, es decir, soluciones desarrolladas por proveedores específicos que imponen restricciones técnicas y contractuales. Estas limitaciones se manifiestan en la dependencia de estaciones de control, sensores y plataformas cerradas, lo cual dificulta la escalabilidad del sistema y restringe la incorporación de nuevas tecnologías o actualizaciones. Además, los altos costos asociados a las licencias de uso y el soporte técnico representan un obstáculo económico para muchos municipios. A ello se suma la dependencia operativa de terceros, que limita la autonomía de las administraciones locales. En muchos casos, al concluir el contrato con el proveedor o al agotarse la vida útil de los equipos, las instalaciones quedan inutilizadas o requieren ser reemplazadas completamente, generando rezago tecnológico y desaprovechamiento de la infraestructura existente. (Messina et al., 2022)

En validez a lo anteriormente descrito, en esta tesis se plantea la creación de una solución de gestión telemática de alumbrados públicos, con un fuerte respaldo en términos de seguridad y eficiencia, capaz de servir como herramienta de apoyo a la gestión pública municipal en el manejo sostenible de recursos energéticos y financieros operativos, así como una razonable opción para una gestión que busca mayor eficacia y transparencia en el uso de recursos públicos de parte de las administraciones municipales. Cabe considerar que, en este sistema, los datos de la gestión analizada permanecen almacenados de manera local en la infraestructura computacional del municipio que lo controla y administra, lo que se traduce en una dependencia casi nula hacia proveedores externos, así como una reducida exposición a eventuales conflictos de índole operacional y/o contractual.

Este hecho conlleva, entre otros beneficios, una mayor independencia en la toma de decisiones sobre los datos, una gradual y desprovista de altos costos reestructuraciones de la infraestructura del sistema para abordar el ingreso de nuevos requerimientos o tecnologías análogas de adaptación escalonada al cambio y un incremento en la calidad, integridad y disponibilidad de la información al no sobreintermediar en su gestión, factores de crucial relevancia para la usabilidad efectiva de la información en el soporte a la toma de decisiones que impone el modelo de gestión sostenido. Para alcanzar esta propuesta, se establece un modelo en base a un recipiente de tecnologías emergentes y convergentes tales como compresión de datos con arquitectura de alto rendimiento, almacenamiento distribuido y los actuales desarrollos en blockchain al respecto en la prospectiva de ofrecer soluciones seguras, eficientes y sostenibles operativamente a largo plazo.

1.2 Motivación

La crisis energética y la falta de consenso respecto de su mejora se remonta incluso a hace una década y, mejorando las condiciones actuales, a los elevados costes energéticos y de mantenimiento que se asumen. Gran parte de su ahorro se revierte en el alma de las administraciones públicas en estos días. Justo ahora, según unos estudios recientes, hasta un 30 por ciento de su coste de la factura, este dinero se puede invertir en el gasto más óptimo para las otras áreas de los mismos clientes: personal, vivienda pública, violencia de género u otras tantas. De ahí la necesidad, cada vez más demandante, de poder cambiar la forma de llevar a cabo estos sistemas tan cruciales.

El contexto actual de crisis económica, ambiental y la presión por el cambio climático, exigen de los sistemas públicos de alumbrado exterior la adopción de tecnologías capaces de reducir su consumo energético, al tiempo que garanticen la transparencia y aseguren mayores niveles de eficiencia en su gestión económica pública. Con este objetivo, la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), juega un rol central. La integración de sistemas AMI proporciona herramientas que mejoran el control y la telemetría del consumo energético, contribuyendo a una gestión más precisa y una mayor transparencia en la cuenta de explotación del servicio de alumbrado público.

La motivación que mueve a llevar a cabo este trabajo final de máster es conseguir transformar la gestión pública del sistema de alumbrado viario mediante la creación de un modelo de gestión descentralizada aprovechando las nuevas tecnologías. Este nuevo modelo no sólo puede proporcionar a las entidades locales un mejor aprovechamiento de los recursos empleados en el alumbrado viario a niveles energético y medioambiental, sino que resuelve de forma segura y transparente los problemas asociados a la gestión de la información generada en este ámbito aplicando las tecnologías de cadena de bloques distribuidas y sistemas de almacenamiento.

La solución debe abordar los retos que presentan a día de hoy los sistemas de gestión públicas en materia de seguridad, integridad y escalabilidad, tanto en el plano técnico como en el cumplimiento normativo. En este contexto, el alumbrado viario se aborda como un servicio público en el que la gestión puede evolucionar hacia un entorno de toma de decisiones basado en datos, siendo una infraestructura que permita la optimización energética, garantizando además la seguridad de la gestión de la información generada, así como de los servicios de otras infraestructuras urbanas.

Se espera que el modelo de gestión propuesto ayude a conseguir una infraestructura pública más sostenible y económica para las entidades locales, así como que sirva de modelo a seguir para la gestión descentralizada o similar en otras infraestructuras de servicio o administración pública. De igual forma, este modelo supone una mejora en la eficiencia energética del sistema de alumbrado viario, así como un aumento de la confianza de la sociedad hacia la administración pública de las entidades locales.

1.3 Relevancia del estudio

Dentro del contexto productivo actual, la sensible urbanización y demanda de servicios públicos ha vuelto a las infraestructuras de alumbrado público uno de los componentes vitales para el sostén óptimo e ideal desarrollo de las actuales ciudades. Desafortunadamente, muchos sistemas de alumbrado cuentan con infraestructuras obsoletas, debido a los períodos de tiempo que cursan desde

su instalación y sus sistemas de control anticuados, lo que genera dificultades para afrontar la modernización del servicio público. Como mérito de este estudio, se presenta una propuesta de solución cuyo objetivo principal es promover y modernizar la gestión de sistemas de alumbrado público a través de un sistema robusto, seguro y, sobre todo, escalable. Introduciendo un modelo de datos que permita la administración moderna de los bienes públicos municipales. Resultando en la mejora de la sostenibilidad, operaciones eficientes y transparentarían de la gestión del servicio de modo no exclusivo. Entre los aspectos de valía se encuentran los siguientes:

- Necesidad de modernización en la gestión de infraestructuras de alumbrado público:

La relevancia de este estudio radica en su capacidad para abordar la creciente necesidad de modernización de los sistemas de alumbrado público. Los gobiernos locales, ante presiones constantes para mejorar la eficiencia energética y reducir costos operativos, requieren soluciones innovadoras. En este contexto, el modelo propuesto, que integra sistemas AMI y tecnologías descentralizadas, se presenta como una respuesta efectiva para la optimización de recursos en las ciudades.

- Optimización de recursos y mayor seguridad en el manejo de datos:

La integración de IPFS, LZ4 y blockchain en este modelo permite una gestión más eficiente de la infraestructura de alumbrado público. Estas tecnologías no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también aportan transparencia y seguridad en el almacenamiento y transmisión de datos. Este enfoque supera las limitaciones de los sistemas centralizados, que suelen ser vulnerables a manipulaciones y presentan dificultades de escalabilidad. Al ser descentralizado, el modelo favorece una gestión autónoma y resiliente de los datos, lo cual es crucial para municipios con limitaciones de infraestructura y presupuesto.

- Aporte a la sostenibilidad y eficiencia en las operaciones urbanas:

El modelo propuesto no solo busca la optimización del alumbrado público, sino que también contribuye a la sostenibilidad y eficiencia de las operaciones urbanas. Al facilitar la integración de tecnologías avanzadas con las infraestructuras existentes, este estudio establece un precedente para la adopción de soluciones tecnológicas innovadoras en el sector público, promoviendo una transformación digital que favorece una gestión más eficiente y transparente de los servicios municipales.

1.4 Planteamiento del problema

Desde su invención, los sistemas de alumbrado público han utilizado tecnologías obsoletas, como los sistemas de lámparas de descarga de haluros metálicos (vapores de sodio, vapores de mercurio). Las lámparas LED eran una alternativa poco utilizada. Sin embargo, en la última década, se ha presentado una tendencia creciente en el uso de luminarias LED, que ofrecen mejor eficiencia, así como mayor durabilidad, lo que ha generado un interés progresivo en la adopción de tecnologías más óptimas e innovadoras. La tendencia ha convertido en la necesidad de modernizar el sistema de alumbrado público y se ha vuelto más específica y técnica, dependiendo de los niveles de demanda de eficiencia energético-económica que han sido solicitados en cada caso (CONUEE, 2015).

Durante la expansión urbana de los años noventa, diversas ciudades de México vieron la instalación masiva de luminarias, resultando en una rápida expansión de los sistemas de alumbrado público. Modernamente estos sistemas se encuentran administrados de forma tradicional y obsoleta, donde la contabilización y control de las lámparas se realiza aún mediante censos manuales, lo que ha ocasionado procesos ineficientes para la estimación y facturación, a su vez ineficientes con los que la asociación dependiente y/o eléctrica, Comisión Federal de Electricidad (CFE), realiza los cálculos del consumo y la facturación hacia los municipios, generando márgenes de errores que impacten directamente en los presupuestos municipales (Natalia Etienne et al., 2014).

A pesar de que en los años 90 se implementaron soluciones tecnológicas básicas, como las terminales portátiles Itron, estas no lograron ofrecer una eficacia completa debido a las limitaciones tecnológicas de la época. Aunque los avances tecnológicos han mejorado algunos aspectos del proceso de gestión, los sistemas actuales no están completamente homologados y continúan dependiendo de procesos manuales y semi-automatizados para el análisis y validación de los censos georreferenciados. Esto no solo introduce riesgos de seguridad y falta de precisión técnica, sino que también genera una notable falta de transparencia y control sobre los datos reales del consumo energético (LED POINT).

La investigación está orientada al desarrollo de un modelo de gestión segura de datos de medidores AMI/IoT, en entornos de Sistemas de Alumbrado Público, con un patrón de consumo que maneja una gran cantidad de dispositivos por usuario, donde se busca garantizar procesos de facturación más eficaces, seguros y transparentes. Entre los retos que asume la propuesta de implementación de blockchain en instalaciones de alumbrado se encuentra la necesidad de una infraestructura óptima para permitir el funcionamiento de transacciones peer-to-peer (P2P) a un bajo costo y de forma segura (Choobineh 2023, Andoni, M et al 2019), así como la complejidad vinculada al mayor impacto en el ancho de banda disponible, problemas de latencia y a una posible demanda por parte de los sistemas de datos excesiva que pueda saturar la red de forma no controlada (Meeuw, 2019).

1.5 Limitaciones de las soluciones actuales

Uno de los principales desafíos que enfrentan hoy en día los municipios en la gestión del alumbrado público tiene que ver con la forma en que se mide el consumo de energía. Actualmente, no existe un estándar técnico unificado que permita validar con precisión la información proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). El sistema que se utiliza, conocido como Sistema Comercial (SICOM), basa sus cálculos en censos manuales que generalmente no reflejan los consumos reales. Esto significa que, incluso cuando alguna lámpara deja de funcionar, el cobro sigue siendo el mismo, afectando directamente las finanzas municipales al generar pagos por servicios que no se están proporcionando (Sistema de Información Energética (SIE, 2017), (Natalia Etienne et al., 2014).

Si bien ya se cuentan con sistemas y tecnologías que permiten la medición y el monitoreo inteligente, como los sistemas AMI, las redes MESH, las Smart Grid, etc., no se han implementado efectivamente en el alumbrado público de la gran mayoría de los municipios. Esta situación representa una oportunidad considerable para explorar el potencial que mejoraría la precisión de los registros, la gestión proactiva de los recursos energéticos y la eliminación de los gastos generados por la falta de inversión de las compañías de energía en este segmento (DOF, 2017).

1.6 Necesidad de un modelo descentralizado para la gestión de datos

La gestión tradicional resulta opaca, imprecisa, costosa y, sobre todo, ineficiente. Hoy en día, la forma en que se mide, registra, almacena y controla la auditoría del consumo de energía y el funcionamiento de la infraestructura física del servicio debe repensarse radicalmente. Algunas de las razones por las cuales es urgente y necesaria la implementación de un modelo descentralizado son:

- Limitaciones de los modelos centralizados: Actualmente, la recolección y análisis de datos se basa en métodos manuales y estructuras centralizadas, como los censos de luminarias, que es una práctica arcaica, ya que muchas veces se hace de forma manual y sin registros digitales, todo en papel y sin certeza. Este enfoque no solo es lento y costoso, sino que también está expuesto a errores humanos y posibles manipulaciones, lo que compromete la confiabilidad de los datos utilizados para la facturación y la gestión energética.
- Necesidad de transparencia y seguridad: La falta de trazabilidad y validación independiente y correcta en los sistemas actuales dificulta mucho los procesos de auditoría del consumo real de energía. Un sistema descentralizado permitiría una mayor transparencia al eliminar intermediarios y registrar la información de manera verificable y accesible en todo momento.
- Integración de tecnologías emergentes, un modelo moderno podría apoyarse en tecnologías complementarias como:
 - IPFS, para asegurar un almacenamiento distribuido y resistente a la pérdida de datos.
 - Un algoritmo de compresión, que facilite la compactación de manera eficiente de grandes volúmenes de información de metrología específicamente sin sacrificar velocidad.
 - Blockchain, que garantiza la integridad, autenticidad y trazabilidad de cada registro, haciendo posible una gestión confiable e inalterable de la información.
- Beneficios operativos y financieros para los municipios: Al automatizar procesos como la recolección de datos o el control de fallas en luminarias, y al obtener mediciones más precisas del consumo energético, los gobiernos locales podrían reducir significativamente el margen de error en la facturación y medición eléctrica. Esto permitiría optimizar los recursos públicos, generar ahorros considerables y mejorar la toma de decisiones en el ámbito de la eficiencia energética (Proyecto Nacional de Eficiencia Energética en Alumbrado Público Municipal, 2015).

Uno de los problemas más graves de la gestión centralizada de los sistemas de alumbrado público es la dependencia de terceros para la recopilación y verificación de datos; los cuales, al ser gestionados principalmente por entidades como la CFE, los municipios pierden la capacidad de ejercer control sobre el proceso completo, lo que deja espacio a discrepancias en la medición del consumo. Esto genera ineficiencias financieras y operativas que afectan las finanzas municipales. Con la implementación de un modelo descentralizado, los municipios obtendrían mayor autonomía y control sobre los datos de sus sistemas de alumbrado, mejorando tanto la eficiencia del servicio como la gestión de recursos (Natalia Etienne et al., 2014).

La implementación de tecnología blockchain es fundamental en este caso, ya que serviría como un libro de contabilidad distribuido, inmutable y auditado sobre el consumo de energía. De este modo, la información relacionada con la actividad solar y el consumo de energía sería transparente, verificable e inalterable mediante algoritmos criptográficos. La gestión descentralizada y la eliminación de terceros de confianza garantizarían registros inalterables y verificables de la utilización horaria de las luminarias, los tiempos de encendido, el consumo de energía y otros datos. Como resultado, los municipios

tendrían la capacidad de auditar y contrarrestar el consumo de energía, disminuyendo significativamente el margen de confianza y los reclamos ficticios.

Un aspecto igualmente importante a considerar para un modelo separado es la integración de tecnologías de medición avanzada, tales como AMI, MESH y SMARTGRID, utilizadas en otros campos de la gestión de la energía. En el modelo separado, estas tecnologías podrían ser implementadas para habilitar la medición directa y la monitorización en tiempo real del consumo eléctrico en cada punto de la instalación. Gracias a la capacidad de medición y supervisión en tiempo real, los municipios podrían aplicar nuevas políticas de ajuste en las estrategias de consumo y ahorro departamental de acuerdo a la información registrada y recibida (Proyecto Nacional de Eficiencia Energética en Alumbrado Público Municipal, 2015).

La combinación de un sistema de almacenamiento descentralizado, como IPFS, y la integración de datos georreferenciados en grandes volúmenes como archivos binarios presenta una alternativa solvente para la gestión de la trama de almacenamiento sobre la capa de datos. De este modo, se garantiza el almacenamiento y disponibilidad mejorada de los datos mediante un sistema de redirección y cacheo mediante algoritmos equivalentes a una red CDN. Esta mejora sobre los servidores de almacenamiento convencionales añade una capa de redundancia y seguridad que previamente no era posible debido a la naturaleza del servidor centralizado, además de prevenir la manipulación de los datos. El uso de compresión LZ4 ayuda a optimizar el envío de los datos mediante fragmentación y compresión de los paquetes, mejorando el rendimiento general.

En conclusión, la adopción de este modelo descentralizado promete transformar la gestión municipal de los sistemas de alumbrado público, mejorando no solo la eficiencia operativa y la transparencia, sino contribuyendo también a los objetivos sostenibles locales y nacionales. Impulsando así una reducción de la huella de carbono e incorporando la sostenibilidad al centro de la gestión municipal, a su vez alineándose con los compromisos territoriales nacionales e internacionales en materia ambiental, el presente modelo facilitaría la transición hacia un uso energético más eficiente y energías limpias en el servicio público u operación del sistema de alumbrado, asociación alianza Empresa Privada - Gobierno Local - Poder Ejecutivo, mediante el Proyecto Nacional de Iluminación Pública Municipal Eficiente (2015).

La adopción de un modelo descentralizado para la gestión de datos en sistemas de alumbrado público presenta numerosos beneficios, tanto en la optimización operativa como en el ahorro financiero para los municipios. Entre los beneficios más relevantes destacan:

- **Transparencia y precisión en la facturación:** El uso de tecnologías descentralizadas, como blockchain, garantiza que los datos de consumo energético de cada luminaria se registren de manera inmutable y distribuida, eliminando errores humanos y reduciendo la posibilidad de manipulaciones o inconsistencias en la facturación. Esto aseguraría que los municipios paguen únicamente por la energía realmente consumida, lo que podría traducirse en ahorros sustanciales en los costos energéticos (DOF, 2017).
- **Automatización del mantenimiento y gestión predictiva:** La integración de tecnologías como IPFS y sistemas de sensores avanzados permitiría monitorear en tiempo real el estado y funcionamiento de cada luminaria. Esto permitiría a los municipios detectar fallos o ineficiencias automáticamente, optimizando el mantenimiento preventivo y reduciendo los tiempos de inactividad. La capacidad

de prever reparaciones o reemplazos prolongará la vida útil del equipamiento y mejoraría la eficiencia operativa (Proyecto Nacional de Eficiencia Energética en Alumbrado Público Municipal, 2015).

- Reducción de la dependencia de intermediarios: La descentralización de la gestión de datos permite a los municipios recuperar el control sobre la infraestructura de alumbrado público, eliminando la dependencia de entidades como la CFE para obtener información crítica sobre el consumo de energía. Al acceder directamente a los datos, los municipios pueden realizar auditorías independientes y tomar decisiones informadas basadas en información precisa y actualizada (Natalia Etienne et al., 2014).
- Alineación con políticas de sostenibilidad: Un modelo descentralizado no solo mejora la eficiencia en términos de costos, sino que también contribuye directamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al optimizar el uso de energía. La implementación de tecnologías de control inteligente, como la integración con redes MESH o SMART GRID, ajustaría el consumo energético a las necesidades reales de cada área, ayudando a los municipios a cumplir con los compromisos de sostenibilidad a nivel local y nacional (Proyecto Nacional de Eficiencia Energética en Alumbrado Público Municipal, 2015).

Capítulo 2. Objetivos y Contribución Científica

2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo para la gestión descentralizada de datos en sistemas de alumbrado público teledorado, mediante la integración de tecnologías como IPFS, LZ4 y blockchain, con el objetivo de mejorar la eficiencia, seguridad y transparencia en el manejo de la información, y garantizar la integridad de los datos generados por dispositivos IoT y sistemas AMI.

2.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo computacional para la gestión descentralizada de datos provenientes de sistemas de AMI, mediante la integración de la tecnología IPFS, LZ4 y blockchain, para la validación y trazabilidad de los datos de consumo de energía, que aseguren la integridad, auditoría y eficiencia operativa de sistemas de alumbrado público teledorado.
- Desarrollar el prototipo funcional de un modelo computacional para la gestión descentralizada de datos, basado en tecnología blockchain, una arquitectura ARM y la integración de interfaces IoT específicas de sistemas de Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) para sistemas de alumbrado público teledorado.

2.3 Contribución científica

Desde la perspectiva de la informática, el diseño de este modelo distribuido introduce contribuciones específicas en los siguientes ámbitos principales de la gestión distribuida eficiente de datos:

1. Modelo computacional replicable para la descentralización de datos AMI:

Se propone construir un modelo que integra tecnologías descentralizadas (blockchain, IPFS) y compresión de datos (LZ4), aplicado al procesamiento de información de sistemas AMI enfocados al alumbrado público. Este modelo podría utilizarse como base para futuras investigaciones y desarrollos en entornos similares donde se requiera alta disponibilidad, resiliencia y verificabilidad de datos en tiempo casi real en gestión masiva de datos para ambientes blockchain.

2. Procesos especializados de gestión de datos distribuidos:

Se propone el desarrollo de estructuras de datos orientadas a la integración de datos provenientes de sensores IoT masivos, su compresión y posterior almacenamiento en sistemas descentralizados. Estos procesos están diseñados para minimizar el uso de memoria, mejorar la latencia y aumentar la eficiencia computacional en redes descentralizadas.

3. Métricas de rendimiento y evaluación de complejidad:

El proyecto incluye pruebas de simulación para generar métricas cuantificables sobre rendimiento computacional en escenarios de baja, media y alta demanda. Estas métricas aportarán información valiosa sobre el comportamiento del sistema ante distintos volúmenes de datos de medición AMI, permitiendo su análisis desde una perspectiva de complejidad y eficiencia en recursos.

4. Contribución a la trazabilidad y auditoría computacional automatizada:

El uso combinado de blockchain e IPFS en este modelo no solo mejora la seguridad y disponibilidad de los datos, sino que permite implementar mecanismos de trazabilidad y auditoría computacional, lo cual constituye una innovación relevante en la forma en que los sistemas verifican, registran y permiten la revisión de datos históricos, especialmente bajo las condiciones normativas y operativas que prevalecen en México.

5. Marco computacional para futuras investigaciones en interoperabilidad de tecnologías descentralizadas para el sector eléctrico público:

Este trabajo ofrece un marco computacional para evaluar la interoperabilidad entre tecnologías de almacenamiento descentralizado y blockchain y compresión avanzada. Este marco puede servir como punto de partida para el desarrollo de soluciones híbridas, modulares y escalables en contextos donde la integración de tecnologías emergentes es crítica usando dispositivos AMI/IoT.

Capítulo 3: Marco Teórico

3.1 Marco teórico

La gobernanza eficiente del sistema de alumbrado público como consumidores de los municipios de México es importante para una mejor gobernanza energética y sostenible. En los últimos años se ha explorado la posible aplicación de la tecnología blockchain mejorando el proceso de gobernanza de los sistemas de medición avanzada APAMI del sistema de alumbrado público (Enríquez Enríquez, 2024). En el presente capítulo se desarrollan los conceptos fundamentales necesarios en la investigación, así como los objetivos, hipótesis, justificación, limitación y el marco metodológico, analizando en un utilitarismo pragmático como convergen estas disciplinas tecnológicas y su relación en el modelo propuesto de gobernanza descentralizada de la APAMI mediante IPFS, LZ4 y blockchain.

3.1.1 Telemedición en sistemas AMI

La telemedición o telegestión de redes de alumbrado, mejor conocida como AMI (Advanced Metering Infrastructure) es la capacidad para medir, recopilar y enviar de manera automática y regular información sobre los niveles de consumo, fallas o el estado operativo del sistema, además de controlar dispositivos en campo (Seitz, 2022).

La infraestructura de instalaciones de medición avanzada se considera una infraestructura básica para la óptima automatización de servicios públicos dentro del concepto de smart cities (Enríquez Enríquez, 2024). Las actuales soluciones en el país consideran una arquitectura completamente centralizada que carece de escalabilidad, transparencia y seguridad. Esta tesis presenta una propuesta descentralizada mediante la integración de tecnologías de almacenamiento distribuido y registro inmutable.

3.1.2 Descentralización

La descentralización es un principio que implica distribuir el control y la toma de decisiones en un sistema entre múltiples participantes, eliminando la dependencia de una única entidad central. En los sistemas descentralizados, cada nodo posee una copia del sistema y opera de forma autónoma, lo que incrementa la resiliencia frente a fallos y ciberataques (Narayanan et al., 2016).

En el contexto de esta investigación, la descentralización permite el desarrollo de un sistema más robusto y seguro para la gestión de datos generados por sistemas de alumbrado público telemedido. Este enfoque evita cuellos de botella, reduce la vulnerabilidad ante ataques al servidor central y promueve una mayor transparencia y autonomía de operación.

3.1.3 IPFS (InterPlanetary File System)

IPFS es un protocolo y red entre pares (peer-to-peer) que permite el almacenamiento y la distribución de contenido en un sistema de archivos descentralizado. Para almacenar los archivos se utilizan direcciones basadas en el contenido (content-addressing) en lugar de ubicaciones (location-based addressing). Asimismo, para ubicar y recuperar los datos de manera eficiente se utilizan estructuras, tal como las Tablas Hash Distribuidas (DHT) (Benet, 2014).

Este sistema es de utilidad en aplicaciones que buscan asegurar la integridad, disponibilidad y resistencia a la censura de la información. Esta investigación utiliza IPFS como una solución de almacenamiento para los datos generados en los sensores y nodos del alumbrado público, permitiendo así al mismo tiempo la descentralización y asegurando tanto la accesibilidad como la seguridad de los archivos (Hernández Rivera, 2021).

3.1.4 Seguridad y privacidad de los datos

La confiabilidad, ya sea en términos de confidencialidad, integridad o disponibilidad, representa uno de los mayores retos en los Sistemas Distribuidos. La implementación de protocolos de criptografía en la tecnología IPFS y en la cadena de bloques permite establecer medidas de control para asegurar que la información almacenada no haya sufrido alteraciones y que, además, este acceso se encuentre restringido a aquellos sujetos que posean las credenciales necesarias. Adicionalmente, el modelo de almacenamiento distribuido y el carácter descentralizado de su red contribuyen a reducir el riesgo de interrupciones en el acceso a la información o de intentos de manipulación (Hernández Rivera, 2021).

Las características de privacidad se abordan en esta investigación, propuesta o artículo al introducir atributos de cifrado y control de versiones para proteger los datos de las interacciones entre los dispositivos de campo, como los sensores y actuadores, en la red de actuadores de una infraestructura de iluminación pública.

En la mayoría de trabajos y estudios analizados se presenta un sistema de comunicaciones de forma centralizada. No obstante, hay que recalcar que este tipo de sistemas posee un sistema de control que presenta un nodo de cabeza donde se encuentra instalado. Hasta la fecha, todas las soluciones que se han propuesto y se encuentran en el mercado se basan en modelos de telemedición de forma centralizada. Por otro lado, se ha podido confirmar que no existe ninguna investigación relevante que adentrándose en los datos tantas su explotación como su autogestión en caso de optar a un u otro sistema centralizado-descentralizado, por lo que consideran que su contenido es actual y, a su vez, novel e innovador de gran impacto y relevancia en la actualidad/presentes (Blanco Rico, 2021).

La gestión eficiente del control digital descentralizado requiere adaptarse a las particularidades que presenta cada conjunto de lámparas. Esto se realiza bajo un protocolo que se inicia en cada calle. Con ello, se intenta lograr la mejora en sí del alumbrado público y su integración con otros sistemas smart (intercomunicación entre las redes de otros sistemas) para la creación de la smart city o ciudad modulada en la que se utiliza la tecnología en mejor provecho comunitario (Landázuri Sánchez, 2023).

3.1.5 Contratos inteligentes

Un contrato inteligente está basado en programas informáticos que se ejecutan autónomamente ante la verificación de las condiciones acordadas explícitamente en el mismo. Así, su implementación en sistemas prescinde de la intermediación, permitiendo el despliegue al interior de diferentes entornos de ejecución, como por ejemplo la lógica operacional de los sistemas públicos (Buterin, 2014).

En el modelo propuesto, los contratos inteligentes permiten automatizar funciones como la auditoría de datos, el reporte de fallas o el control de mantenimiento. Esto incrementa la eficiencia operativa del sistema de alumbrado telemedido y garantiza una mayor trazabilidad de las acciones ejecutadas.

La principal ventaja de blockchain radica en la información. Cuanto más rápido se reciba y más preciso sea, mejor. Blockchain es la tecnología adecuada para transmitir esa información, ya que permite compartir información en tiempo real, de forma consensuada y completamente transparente en un libro mayor inmutable, con acceso solo para los miembros de la red autorizados. Una red blockchain puede soportar pedidos, pagos, cuentas, producción, y más. Y dado que los miembros de la red tienen acceso a un solo registro de verdad, pueden seguir un pedido de principio a fin y ver todos los detalles de una transacción, lo que genera más confianza, así como nuevas eficiencias y oportunidades. (IBM, 2025).

- Tecnología de contabilidad distribuida: Todos los participantes de la red tienen acceso al libro mayor distribuido y su registro inmutable de transacciones. Con este libro mayor compartido, las transacciones se registran solo una vez, eliminando la duplicación de esfuerzos típica de las redes comerciales tradicionales (IBM, 2025).
- Registros inmutables: Ningún participante puede cambiar o alterar una transacción después de que se haya registrado en el libro mayor compartido. Si un registro de transacción incluye un error, se debe agregar una nueva transacción para revertir el error y ambas transacciones serán visibles (IBM, 2025).
- Contratos inteligentes: Para acelerar las transacciones, un conjunto de reglas, llamado contrato inteligente, se almacena en una blockchain y se ejecuta automáticamente. Un contrato inteligente puede definir las condiciones para las transferencias de bonos corporativos, incluir términos para el pago del seguro de viaje y mucho más (IBM, 2025).
- A medida que ocurre cada transacción, se registra como un "bloque" de datos, esas transacciones muestran el movimiento de un activo que puede ser tangible (un producto) o intangible (intelectual). El bloque de datos puede registrar la información de su elección: quién, qué, cuándo, dónde, cuánto e incluso la condición, como la temperatura de un envío de alimentos. (IBM, 2025).

Cada bloque está conectado con los anteriores y posteriores. Estos bloques forman una blockchain de datos a medida que un activo se mueve de un lugar a otro o la propiedad cambia de manos. Los bloques confirman la hora exacta y la secuencia de las transacciones, y los bloques se vinculan de forma segura para evitar que se altere cualquier bloque o que se inserte un bloque entre dos bloques existentes. (IBM, 2025).

Las transacciones se agrupan en una blockchain irreversible, en la que cada bloque adicional refuerza la verificación del anterior y, con ello, de toda la cadena. Este mecanismo convierte a la blockchain en una tecnología resistente a la manipulación, otorgándole su principal fortaleza: la inmutabilidad. Gracias a ello, se elimina la posibilidad de alteración por parte de actores maliciosos y se establece un libro distribuido de transacciones confiable para todos los miembros de la red (IBM, 2025).

Dentro de los beneficios de la tecnología blockchain están:

- Lo que debe cambiar: las operaciones a menudo desperdician esfuerzos en el mantenimiento de registros duplicados y validaciones de terceros. Los sistemas de mantenimiento de registros pueden ser vulnerables al fraude y los ataques cibernéticos. La transparencia limitada puede

ralentizar la verificación de datos, y con la llegada de IoT, los volúmenes de transacciones se han disparado (IBM, 2025).

- Mayor confianza: Con blockchain, como miembro de una red solo para miembros, se puede estar seguro de que se están recibiendo datos precisos y oportunos, y que los registros confidenciales de blockchain se compartirán solo con los miembros de la red a quienes se les haya otorgado acceso específicamente (IBM, 2025).
- Mayor seguridad: Se requiere consenso sobre la precisión de los datos de todos los miembros de la red, y todas las transacciones validadas son inmutables porque se registran de forma permanente. Nadie, ni siquiera un administrador del sistema, puede eliminar una transacción (IBM, 2025).
- Más eficiencias: Con un libro mayor distribuido que se comparte entre los miembros de una red, se eliminan las conciliaciones de registros que son una pérdida de tiempo. Y para acelerar las transacciones, un conjunto de reglas, llamado contrato inteligente, puede almacenarse en la blockchain y ejecutarse automáticamente (IBM, 2025).

Tipos de red blockchain

Hay varias formas de construir una red blockchain.

1. Redes públicas de blockchain: Una blockchain pública es aquella a la que cualquiera puede unirse y participar, como Bitcoin. Los inconvenientes pueden incluir una potencia computacional sustancial requerida, poca o ninguna privacidad para las transacciones y seguridad débil. Estas son consideraciones importantes para los casos de uso empresarial de blockchain (IBM, 2025).
2. Redes privadas de blockchain: Una red blockchain privada, similar a una red blockchain pública, es una red peer-to-peer descentralizada. Sin embargo, una organización gobierna la red, controlando quién puede participar, ejecutar un protocolo de consenso y mantener el libro mayor compartido. Dependiendo del caso de uso, esto puede aumentar significativamente la confianza entre los participantes. Una blockchain privada puede ejecutarse detrás de un firewall corporativo e incluso alojarse en las instalaciones (IBM, 2025).
3. Redes de blockchain autorizadas: Las empresas que configuran una blockchain privada generalmente establecerán una red de blockchain autorizada. Es importante tener en cuenta que también se pueden autorizar las redes públicas de blockchain. Esto impone restricciones sobre quién puede participar en la red y en qué transacciones. Los participantes necesitan obtener una invitación o permiso para unirse (IBM, 2025).
4. Cadenas de bloques del consorcio: Múltiples organizaciones pueden compartir las responsabilidades de mantener una blockchain. Estas organizaciones preseleccionadas determinan quién puede enviar transacciones o acceder a los datos. Una blockchain de consorcio es ideal para los negocios cuando todos los participantes deben tener permiso y tener una responsabilidad compartida por la blockchain (IBM, 2025).

Capítulo 4: Estado del arte

4.1 Metodología para revisión de la literatura

Con el objetivo de establecer un marco teórico sólido para el modelo propuesto, se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura (Systematic Literature Review, SLR) utilizando la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Para ello, se imprimió y adaptó el diagrama de flujo PRISMA, el cual permitió organizar el proceso de búsqueda, selección y depuración de fuentes. Asimismo, se discutió con la dirección de la tesis la conveniencia de reportar los resultados por base de datos y en forma acumulada, garantizando consistencia metodológica.

Una revisión sistemática debe tener como pregunta de investigación la pregunta que rige el protocolo de revisión sistemática y en este caso dicha pregunta debía responder a la siguiente interrogante: ¿Qué modelo de gestión descentralizada de datos en alumbrado público telemedido, implementando las tecnologías IPFS, LZ4 y blockchain, mejora la eficiencia, seguridad y transparencia en el manejo de información? Esto se debe a que es el objetivo principal de esta investigación desarrollado en mejor profundidad en el capítulo correspondiente a los resultados de la investigación y está conformado por un conjunto de frases que determinan una sola idea central para poder facilitar su manejo e interpretación.

Asimismo, la pregunta debía estar vinculada con los objetivos específicos planteados:

- a) La construcción de un modelo computacional que garantice integridad, trazabilidad y eficiencia operativa en sistemas de alumbrado público telemedido.
- b) El desarrollo de un prototipo funcional basado en blockchain, arquitectura ARM e interfaces IoT aplicadas a entornos AMI.

En este marco, la pregunta de investigación formulada fue:

¿Cuáles son las contribuciones y limitaciones de los trabajos científicos recientes que comparan el uso combinado de tecnologías IPFS, LZ4 y blockchain para fines de compresión, almacenamiento y validación de datos en sistemas AMI/IoT en el ámbito del alumbrado público telemedido? Este planteamiento determinó la aplicación de la metodología PRISMA al establecer los criterios de inclusión y exclusión y garantizar que los trabajos consultados contribuyeran a la elaboración del estado del arte y la validación del modelo propuesto elaborado y presentado en la presente tesis doctoral.

4.2 Estrategia de búsqueda en bases de datos

Se realizó búsqueda en bases de datos científicas como IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, MDPI y Google Scholar. Para asegurar un alcance y pertinencia, se utilizó vocabulario específico en español e inglés, así como las categorías temáticas que investigan sobre el modelo data management descentralizado.

Las palabras clave utilizadas fueron las siguientes:

- En español
 - “Iluminación pública AND Blockchain AND IoT”
 - “Control de luminarias AND AMI AND Telemedición”
 - “Ahorro energético AND alumbrado urbano AND eficiencia”
 - “IPFS AND compresión LZ4 AND gestión de datos”
 - “Redes MESH AND AMR AND AMS”
 - “Alumbrado público inteligente AND descentralización de datos”



Figura 4.1. Palabras clave en español

- En inglés
 - “Smart street lighting AND Blockchain AND IoT”
 - “Lighting efficiency AND AMI AND decentralized control”
 - “Energy savings AND public lighting AND telemetering”
 - “IPFS AND LZ4 compression AND data storage”
 - “MESH networks AND AMR AND AMS in smart grids”
 - “Decentralized data management AND smart lighting”



Figura 4.2. Palabras clave en inglés

4.3 Inclusión de fuentes adicionales

Además de las bases de datos electrónicas consultadas, se consideraron fuentes adicionales con el propósito de ampliar el alcance de la revisión y reducir posibles sesgos derivados de la exclusión de literatura no indexada. Entre estas fuentes se incluyó la revisión manual de referencias bibliográficas de artículos clave, lo que permitió identificar estudios complementarios que no habían emergido en la búsqueda inicial. Asimismo, se consultaron catálogos institucionales y repositorios académicos de universidades y centros de investigación, los cuales aportaron tesis de posgrado, reportes técnicos y memorias de congresos. De manera complementaria, se incorporó literatura gris, conformada por documentos no publicados en canales comerciales tradicionales, tales como informes gubernamentales, reportes técnicos especializados y tesis de doctorado o maestría vinculadas al tema de gestión de datos descentralizados y tecnologías blockchain. También se analizaron actas de congresos y conferencias en áreas relacionadas con blockchain, IoT, energía y seguridad de datos, ya que constituyen una fuente valiosa de investigaciones recientes aún en proceso de publicación. Finalmente, se revisaron normativas y estándares técnicos emitidos por organismos internacionales como IEEE, ISO y NIST, que proporcionan un marco regulatorio y metodológico relevante para contextualizar la aplicación práctica del modelo propuesto.

Las consultas incluyeron operadores booleanos, filtros por rango de fechas (2015–2025), tipo de publicación (artículos de revistas y conferencias arbitradas), e idioma (inglés y español). Cada búsqueda generó un número inicial de registros que se incorporó en la primera etapa del diagrama PRISMA.

4.4 Eliminación de duplicados

Los resultados iniciales arrojaron un elevado número de duplicados debido a coincidencias entre bases de datos. Dichos registros fueron depurados de forma manual y mediante herramientas de gestión bibliográfica, con el fin de mantener únicamente artículos únicos y relevantes. Tras esta etapa, se redujo significativamente el universo de documentos a evaluar.

4.5 Cribado inicial (screening)

Posteriormente, se efectuó un cribado preliminar mediante la revisión de títulos y resúmenes. En esta fase se evaluaron 247 registros y se excluyeron 114 (incluyendo duplicados y trabajos no pertinentes), quedando 133 registros para evaluación a texto completo (elegibilidad).

Las principales razones de exclusión fueron:

- Enfoque centrado exclusivamente en criptomonedas sin relación con gestión de datos energéticos o alumbrado público.
- Compresión de datos en contextos ajenos a IoT/AMI o sin aplicación a infraestructuras energéticas.
- Estudios fuera del ámbito de redes energéticas, iluminación pública o infraestructuras críticas.

4.6 Evaluación de elegibilidad

Los artículos restantes fueron sometidos a una lectura completa para determinar su elegibilidad final. Los criterios de inclusión fueron:

- a) Relevancia con respecto a blockchain, IPFS, LZ4, IoT o alumbrado público,
- b) Publicaciones entre 2015 y 2025,
- c) Revisión por pares,
- d) Aportes experimentales o modelos aplicables a la gestión de datos en entornos energéticos.

Se excluyeron aquellos que no cumplían con estos requisitos, especialmente trabajos de carácter puramente teórico o sin evidencia empírica.

4.7 Inclusión final de estudios

Como resultado del proceso de búsqueda y selección sistemática basado en la metodología PRISMA, se incluyeron finalmente 24 documentos que cumplen con los criterios de pertinencia, calidad y relevancia para el estado del arte de esta investigación. Estos estudios representan el núcleo de evidencia académica y técnica que sustenta el análisis comparativo y la propuesta metodológica planteada.

Con el propósito de organizar de manera clara los hallazgos, los trabajos seleccionados se agruparon en cinco categorías principales, correspondientes a los ejes temáticos de este estudio:

a) Algoritmo de compresión LZ4.

Incluye investigaciones que describen el funcionamiento del algoritmo, su desempeño en escenarios de alto volumen de datos y su aplicabilidad en la transmisión eficiente de lecturas de telemedición.

b) Alumbrado público.

Comprende estudios que analizan la gestión, operación y modernización de los sistemas de alumbrado, destacando propuestas que integran IoT, telemedición y eficiencia energética.

c) AMI/IoT.

Reúne investigaciones sobre infraestructura de medición avanzada, protocolos de comunicación y esquemas de integración de IoT en entornos eléctricos, con énfasis en la telemetría de consumos energéticos.

d) Energéticos con blockchain.

Abarca literatura centrada en el uso de tecnologías blockchain en mercados eléctricos, microrredes y gestión de datos energéticos, incluyendo la aplicación de contratos inteligentes para trazabilidad y seguridad.

e) IPFS y blockchain.

Se examinan estudios que analizan arquitecturas híbridas sobre almacenamiento distribuido (IPFS) y blockchain, empleadas para asegurar integridades, trazabilidad y disponibilidad de la información. Esta clasificación no solo proporciona una visión clara de la investigación realizada en estas temáticas, sino que también permite identificar vacíos en la literatura y sinergias para integrar características que apoyan la propuesta del modelo AMI–LZ4–IPFS–Blockchain diseñado en esta investigación.

4.8 Diagrama de flujo PRISMA

Se incorpora el diagrama de flujo PRISMA adaptado con los datos reales obtenidos: número de registros identificados, duplicados, artículos evaluados, excluidos y finalmente incluidos.

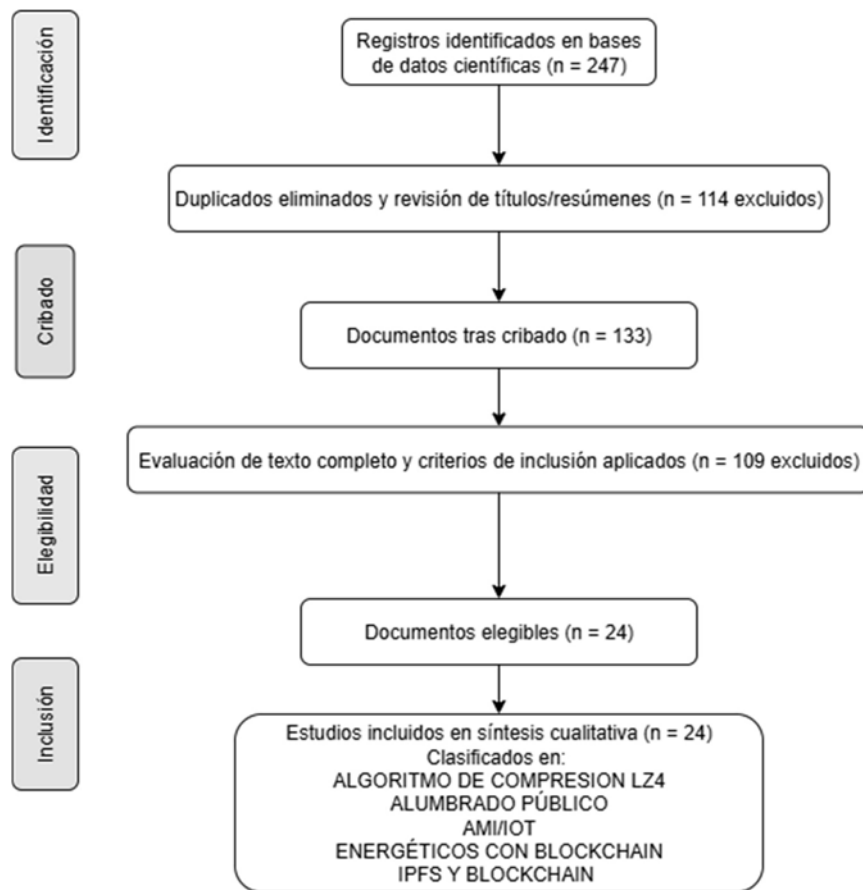


Figura 4.3. Diagrama de flujo PRISMA.

4.9 Tabla del estado del arte

La Tabla 1 presenta una síntesis estructurada de los 24 estudios seleccionados a través del proceso PRISMA, organizados en cinco categorías temáticas principales: Algoritmo de Compresión LZ4, Alumbrado Público, AMI/IoT, Energéticos con Blockchain, e IPFS y Blockchain. Esta clasificación permite identificar de manera clara las contribuciones de cada trabajo al estado del arte y su relación con los objetivos de esta investigación.

Cada entrada de la tabla incluye la referencia, el año de publicación, la fuente y el tipo de documento, así como una breve descripción de la aportación principal de cada estudio. De esta forma, se facilita el análisis comparativo entre diferentes enfoques y tecnologías aplicadas en la gestión descentralizada de datos y su aplicación en redes de medición eléctrica.

El análisis conjunto de los estudios permite extraer varias conclusiones clave:

- En compresión de datos, LZ4 se confirma como un algoritmo altamente eficiente, capaz de reducir el tamaño de archivos sin pérdida y con tiempos mínimos de procesamiento, lo que lo hace adecuado para entornos de telemetría masiva.

- En el ámbito del alumbrado público, los trabajos destacan la evolución hacia modelos basados en IoT y plataformas distribuidas, orientados a la eficiencia energética y a la reducción de costos de operación.
- Respecto a los sistemas AMI/IoT, se observa un énfasis en la interoperabilidad, la integración con tecnologías de comunicación de baja potencia y la necesidad de gestionar grandes volúmenes de datos en tiempo casi real.
- En aplicaciones energéticas con blockchain, se consolidan las propuestas que utilizan contratos inteligentes y mecanismos de consenso para la trazabilidad de transacciones, la transparencia en mercados energéticos y el comercio de energía P2P.
- En lo referente a IPFS y blockchain, se reconoce el potencial de la descentralización en el almacenamiento y transmisión de datos, reforzando la integridad, seguridad y resistencia frente a fallos o censura.

De esta manera, la Tabla 1 constituye una referencia fundamental que respalda la justificación del modelo AMI–LZ4–IPFS–Blockchain, al demostrar cómo los avances tecnológicos revisados confluyen en la solución propuesta y al mismo tiempo evidencian los vacíos de investigación que este trabajo busca atender.

Tabla de artículos seleccionados:

Nº	Categoría	Referencia / Autores	Año	Fuente / Tipo	Aportación principal
1	Algoritmo de compresión LZ4	Proyecto LZ4. <i>Block Format Description</i>	2025	Especificación / LZ4	Especifica el formato de bloque LZ4 y parámetros de compresión.
2	Algoritmo de compresión LZ4	Charne, A. <i>Optimización y performance en almacenamiento distribuido</i>	2021	Artículo / Evaluación	Estrategias de optimización (incl. compresión) en sistemas distribuidos.
3	Algoritmo de compresión LZ4	Masso, M. <i>Blockchain data compression & libraries</i>	2019	Tesis/Reporte	Evalúa LZ4, LZMA, LZO para compresión de blockchains y nodos ligeros.
4	Algoritmo de compresión LZ4	Chen, X.; Lin, S.; Yu, N. <i>Bitcoin blockchain compression for blank nodes</i>	2019	Artículo / Investigación	Propone sustituir punteros hash por índices; reduce almacenamiento en ~12.7%.
5	Algoritmo de compresión LZ4	Collet, Y. <i>LZ4 – Extremely Fast Compression</i>	2013	Artículo técnico / LZ4	Define LZ4 como compresión sin pérdida ultrarrápida, idónea para IoT/edge.
6	Alumbrado público	Cabrera Rojas, E.; Condori, J. <i>Supervisión de alumbrado público (Sicuaní)</i>	2024	Tesis/Proyecto	Implementa IoT/AMI para supervisión de luminarias en ciudad peruana.
7	Alumbrado público	García Jacobs, J. <i>Gestión municipal del alumbrado público</i>	2023	Informe / Libro	Panorama de gestión centralizada y retos operativos en municipios.
8	Alumbrado público	Oadowicz, A.; Grela, J. <i>Energy control for outdoor lighting</i>	2016	Revista / Investigación	Integración BMS, sensores y control avanzado para iluminación exterior.
9	Alumbrado público	Mohamed, S.A.E. <i>VANET-based smart street lighting</i>	2013	Artículo / Propuesta	Control y monitoreo con VANET; ahorros energéticos y mayor vida útil.
10	Alumbrado público	Janiga, P.; Gašparovský, D. <i>Street lighting energy measurement & evaluation</i>	2012	Conferencia / Metodología	Metodologías de medición y evaluación del consumo en tramos de alumbrado.
11	AMI/IoT	Enríquez Enríquez, J. <i>Plataformas de gestión de alumbrado (México)</i>	2024	Estudio comparativo	Benchmark de soluciones AMI/IoT para alumbrado público en México.

12	AMI/IoT	Sánchez Sutil, F. <i>Medición y control de alumbrado vía LoRa</i>	2020	Artículo / Implementación	Dispositivos Arduino + LoRa para telemedición y control de luminarias.
13	AMI/IoT	Ferreira, J.C. <i>Open market energy community (IoT & gamificación)</i>	2018	Artículo / Caso	Plataformas IoT, smart meters y participación del usuario en energía.
14	AMI/IoT	Padrón, S. <i>IA en operación de redes eléctricas (aisladas)</i>	2015	Tesis/Libro	Agentes y KB para gestión/optimización en redes eléctricas (aplica a AMI).
15	Energéticos con blockchain	Abdella, J. et al. <i>P2P energy trading architecture & performance</i>	2021	Revisión / Evaluación	Análisis de cuellos de botella, privacidad y transparencia en P2P-ET.
16	Energéticos con blockchain	Zhou, Y. <i>Integrated microgrid with blockchain</i>	2020	Artículo / Debate	Confianza y procesamiento fiable en nodos distribuidos de microrredes.
17	Energéticos con blockchain	Wu, J. <i>Blockchain in sustainable energy systems: overview</i>	2018	Revisión	Usos en certificados de carbono, VPP, demanda y seguridad de datos.
18	Energéticos con blockchain	Mattila, J.; Seppälä, T. <i>Data coordination for decentralized energy</i>	2017	Informe / Investigación	Arquitecturas de coordinación descentralizada con smart contracts.
19	Energéticos con blockchain	Okoye, M. et al. <i>Transactive microgrids with blockchain</i>	2017	Artículo / Modelo	Modelo transactivo con permisos optimizados; mejor velocidad de transacción.
20	Energéticos con blockchain	Wang, J. <i>Blockchain & continuous double auction in microgrids</i>	2017	Artículo / Propuesta	Subasta doble continua y certificados digitales para comercio de energía.
21	IPFS y blockchain	Benet, J. <i>IPFS: Content Addressed, Versioned, P2P File System</i>	2014/15	arXiv / White paper	Base del almacenamiento distribuido por contenido (CID) aplicable a energía.
22	IPFS y blockchain	Suhendri, D.; Suryana, N. <i>Blockchain for Public Street Lighting Sensors</i>	2023	Artículo / Caso	Seguridad y trazabilidad de datos de sensores en alumbrado público.
23	IPFS y blockchain	Zareen, F. et al. <i>Blockchain and IPFS service model for IoT</i>	2021	Artículo / Modelo	Arquitectura IoT con IPFS + blockchain; PoA, SHA-256, smart contracts.
24	IPFS y blockchain	Bronski, P. et al. <i>D3A – Decentralized Autonomous Area Agent</i>	2018	Informe / Modelo	Mercado transactivo descentralizado (agentes) para recursos distribuidos.

Tabla 4.1. Tabla del estado del arte.

Actualmente, en la gran mayoría de núcleos urbanos, el mantenimiento del sistema de alumbrado público depende del ente municipal que tiene la responsabilidad de la instalación. Para poder gestionar estos conjuntos de luminarias que en la actualidad suman miles e incluso millones de puntos de luz, se centraliza toda esta información en un sistema de gestión del alumbrado público en los Servicios Municipales. Subcontratando estos servicios a empresas de servicios energéticos o, bien, si la seguridad de pago lo permite, se realiza un contrato de mantenimiento directo a las luminarias con alguna empresa electricista (García Jacobs, 2023).

En los Estados Unidos, en países de la UE y en China, la cantidad total de puntos de luz se mide en decenas o miles de miles, para cuyo caso hay datos sobre el número de puntos de luz en las siguientes ciudades: Oslo, Noruega: 65.000 lámparas, Varna, Bulgaria: 1.000 lámparas, Ámsterdam, Países Bajos: 2.300 lámparas. Se considera que en las ejecutadas o en fase de ejecución en los países de modo capitativo los sistemas de mantenimiento de validez mediante lámparas de calefacción en el alumbrado de calles así como redes de datos integradas e intercambio integrado, mediante sistemas de las

llamadas ciudades inteligentes, control y supervisión de procesos, gestión integrada de TS y física media y gestión mediante demanda de energía (demanda prospectiva) y mediante servicios de consumos razonables, siendo las comparativas e funcionalidad sobre las soluciones técnicas implementadas con anterioridad, sobresaliendo principalmente los explosivos puntos en TS física media de usuario, así como sobre el volumen en TSA de ganancia energética y de la reducción de costos de TADA y mantenimiento y económica para el usuario final (Andrzej Oadowicz & Jakub Grela. 2016).

En la siguiente investigación se mencionan, aunque de manera breve, los experimentos, investigación y desarrollo de sistemas de control algorítmico para la iluminación. La iluminación exterior y de la calle, la vigilancia y datos de control pueden, mejorando funcionalmente, integrarse con el sistema básico del edificio, junto con otros subsistemas e infraestructuras, así como otros tipos de unidades de trabajo fuertemente conectadas e influyentes, entre los cuales se encuentran también: estaciones meteorológicas, sistemas de movimiento/presencia, sistemas de fuente de luz. Sensor, sistemas de supervisión óptica e intensidades de luz, cables de control y sistemas de teléfono móvil, entre otros. (Andrzej Oadowicz & Jakub Grela. 2016)

También se propone un nuevo enfoque de formulación de control de estrategias funcionales troncales, basadas en la BAC clases de eficiencia, así como la posibilidad de utilizar la guía EN-15232 en un nuevo campo, por ejemplo, organización de sistemas de control para la instalación de alumbrado público, el cual ha sido investigado, estudiado, descrito y se centra en los sistemas de control de energía de iluminación exterior. Esto se logra mediante cambios de organización y comportamiento (Andrzej Oadowicz & Jakub Grela. 2016).

Los sistemas de alumbrado público y exterior ofrecen a los ciudadanos vías de acceso iluminadas y seguras, embellecen y dan un toque acogedor a los espacios públicos y garantizan la seguridad en los hogares, los locales comerciales y los centros neurálgicos de nuestras ciudades. Como prueba de ello, los sistemas de alumbrado exterior son una de las instalaciones más demandadas e importantes en la infraestructura de todo el mundo. Según diferentes fuentes, se estima que la instalación e implementación de la iluminación pública consume cerca del 40% del gasto total en electricidad, lo cual resulta bastante costoso y genera un considerable impacto ambiental (Andrzej Oadowicz & Jakub Grela, 2016).

En la Fig. 4.4 se presenta un diagrama de bloques con las interconexiones entre los módulos de la luminaria. Además, en cada luminaria se implementó el proceso para garantizar la alta fiabilidad de los datos recibidos por los módulos o enviados a otros elementos del sistema a través del canal PLC (power line communication). El mencionado proceso corrige errores del lector de datos introducidos por ruidos e interferencias, que se producen en el canal de comunicación. Las luminarias, debido a los dispositivos electrónicos de control y medidas incorporados, gozan de los beneficios que otorga la tecnología de telemetría y telegestión a nivel de control de carga de luminarias (funciones de conmutación y regulación del flujo luminoso), telemétrica de tensiones de cada luminaria, de consumos, contador de horas de uso, de parámetros de operación, etc. (ver figura 4.4).

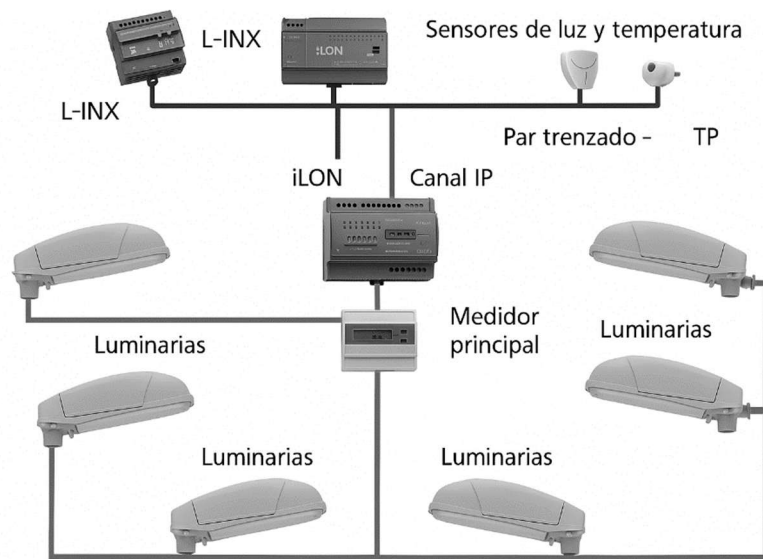


Figura 4.4: Investigación en control de energía para iluminación exterior, Andrzej Oadowicz & Jakub Grela. 2016.

El documento de la Alianza Energética Mexicana titulado "Blockchain en el Sector Energético Mexicano" es de suma importancia tanto conceptual como práctica para la formulación de la tesis modelo de gestión descentralizada de datos en sistemas telemedidos de alumbrado público modulando IPFS, LZ4 y blockchain, ya que estudia profundamente a blockchain, señalando sus usos actuales y potencialidades en el sector energético mexicano. Sin embargo, trata sobre ninguna de estas dos herramientas mencionadas como IPFS o LZ4. Debido a estos puntos, el documento es de gran utilidad para responder a las justificaciones grupales y a los marcos teóricos que más adelante se utilicen.

En el trabajo de investigación Blockchain and IPFS based service model for the internet of things, (Zareen et al., 2021), se propone un modelo de servicio basado en blockchain e IPFS (InterPlanetary File System) para el Internet de las Cosas (IoT), con el objetivo de mejorar la seguridad, la descentralización y la eficiencia en la gestión de datos. Se destaca el uso de IPFS para almacenar datos de manera distribuida y segura, mientras que la blockchain se utiliza para garantizar la integridad y la inmutabilidad de los datos mediante el almacenamiento de hashes cifrados. Además, se propone un mecanismo de consenso basado en Proof of Authority (PoA), que consume menos recursos y tiene menor latencia en comparación con Proof of Work (PoW). El modelo también incluye un esquema de verificación de servicios utilizando el algoritmo SHA-256 y contratos inteligentes para resolver disputas entre consumidores y proveedores de servicios.

En el ámbito de "viabilidad del sistema de medidas e informes de consumo de energía en redes de iluminación de calle" se mencionan conceptos como Smart ME y Smart GR, que son tecnologías que ofrecen nuevas oportunidades en diferentes sectores. La evaluación de la eficiencia energética en redes de alumbrado público permite la posibilidad de llevar a cabo auditorías y verificaciones del consumo energético de los sistemas de iluminación. (Janiga P., Gašparovský, D. 2012). Esto, a su vez, podría servir como base para la normalización y comparación de las vías relevantes, y por lo tanto, para la verificación de la eficacia de las medidas de optimización propuestas en el proyecto.

Por otro lado, la UE creó un mandato para evaluar el consumo de energía de los sistemas de alumbrado público. Es una de las mejores formas de evaluar la eficacia de las soluciones propuestas y cumplir con el Protocolo de Kioto para reducción eficaz de emisiones contaminantes. La metodología de evaluación fue creada por el grupo de trabajo CEN TC 169/226 JWG. El objetivo no solo es definir el proceso de evaluación sino también verificar la medición del consumo energético en las secciones bajo consideración (Janiga P., Gašparovský, D. 2012).

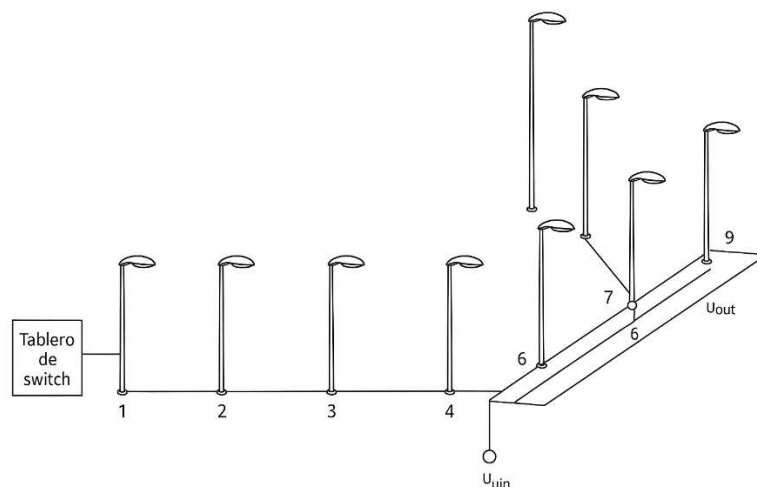


Figura 4.5. Ejemplo de medición del consumo de energía para la sección seleccionada (Janiga P., Gašparovský, D. 2012).

Al desplegar una solución de blockchain empresarial, es necesario implementar una estrategia de seguridad integral que combine estándares y herramientas de ciberseguridad, ofertas de auditoría y medidas preventivas y correctivas en las tres capas de seguridad del producto, para minimizar el riesgo de ataques externos, fraudes internos y vulnerabilidades asociadas a las configuraciones (IBM, 2025).

A continuación, se presentan y analizan las características más relevantes de los artículos del estado del arte, en los cuales se utiliza la tecnología blockchain como herramienta informática para el control de los equipos teledirigidos y al cual se orienta el presente trabajo de tesis.

En el contexto de la digitalización, el poder del consumidor de ser activo en ambos lados del mercado, como vendedor y comprador, ha crecido significativamente, especialmente en la energía, lo que ha sido ampliamente reconocido en varias partes de la industria, así como en la investigación. El statu quo de la infraestructura energética de producción en masa se basa en suposición de que la información sobre el origen, la asignación y el destino de la energía es físicamente cara de obtener (Mattila, J., & Seppälä, T, 2017).

Recientemente, han crecido las soluciones de energía descentralizadas y los costes de integración de sensores han disminuido, creando la capacidad de recopilar datos a través de una red descentralizada más amplia. De particular interés es si la coordinación de la administración de energía descentralizada debería ser centralizada o descentralizada (Mattila, J. et al., 2017).

Se presenta una prueba de concepto de un caso de uso en el marco de la cadena de bloques. Se investiga si la cadena de bloques se puede utilizar para implementar una arquitectura de coordinación distribuida basada en la información centrada y administración para sistemas de energía descentralizados, con una aplicación de prueba de concepto que utiliza contratos inteligentes de Ethereum para facilitar la coincidencia del mercado entre los prosumidores y prosumidores que buscan comprar y vender electricidad respectivamente, sin necesidad de que existan mercados habilitados o intermediarios de confianza centralizados. (Mattila, J., & Seppälä, T, 2017).

Esta aplicación demuestra que los productores y consumidores podrían organizarse en formas innovadoras que trascienden las estructuras industriales y sociales actuales. Con el lanzamiento de la aplicación de demostración, se plantean los siguientes pasos de investigación y desarrollo. En primer lugar, se propone la construcción de un experimento de laboratorio en torno a dicha aplicación, utilizando dispositivos físicos y transacciones reales de electricidad. En segundo lugar, se sugiere el análisis de las restricciones técnicas y jurídicas que enfrentan estos mercados distribuidos en el contexto tecnológico y regulatorio vigente, como la escalabilidad de las arquitecturas de consenso distribuidas. Finalmente, se recomienda la realización de estudios con grupos focales para determinar si la demanda del mercado por este tipo de distribución podría reflejarse en las arquitecturas que se implementen en el futuro (Mattila & Seppälä, 2017).

Otro estudio del blockchain es el que está enfocado como modelo de transacciones para microrredes de intercambio de energía. En el sector eléctrico, las microrredes desempeñan un papel de apoyo para cerrar la brecha de adecuación en el suministro eléctrico convencional. El Blockchain ha mejorado recientemente el comercio de la energía generada, tecnología que ofrece un nuevo enfoque de transacción económico, seguro y descentralizado (Okoye et al., 2017).

Se propone un modelo de microred transaccional mejorada cibernéticamente utilizando tecnología blockchain con el protocolo de permiso optimizado de los participantes para mejorar este desafío. Se demuestra que el modelo de permiso optimizado de los participantes de blockchain permite mejorar la velocidad de transmisión y proporciona mayor conveniencia.

Posteriormente, se realizó una simulación de la velocidad de transacción, y se demostró que, en una red de nodos, el tamaño de la población tiene un efecto más significativo que el tamaño del bloque sobre el rendimiento de la red y la velocidad de las transacciones (Okoye et al., 2017).

La adopción del concepto de blockchain en las microrredes se encuentra motivada por los avances registrados en el ámbito financiero y su posterior implementación en sectores industriales de la economía. En el sector financiero, las transacciones con criptomonedas han sido viabilizadas mediante la tecnología Bitcoin. De manera similar, en el Reino Unido, la Food Standards Agency ha empleado blockchain con éxito como herramienta regulatoria en el control de ganado destinado al matadero, garantizando el cumplimiento normativo en el sector alimentario y reforzando la protección de la salud pública. Un resultado análogo puede observarse cuando la experiencia adquirida en el ámbito financiero se traslada al sector eléctrico, particularmente en el comercio de energía en microrredes (Okoye et al., 2017).

Las transacciones P2P son habilitadas por blockchain. Anteriormente en Nueva York, los prosumidores de energía.Coreaban su excedente generado por energía solar a la empresa de servicios públicos. Esto no les camaradas mucho, ya que el dinero no se les pagaba directamente, sino que disminuía su

anterior y posteriores recibos de uso de electricidad. Por lo tanto, cuando ocurre una falla y se experimenta un apagón en el ámbito de los servicios públicos, tanto los prosumidores como sus paneles solares se apagan a pesar de poder crear su poder.

Dentro de los trabajos relacionados con alumbrado público soportado por tecnología electrónica y de comunicaciones se encuentra el Sistema inteligente de medición y control de alumbrado público mediante red LoRa donde se basa en la instalación de medidores inteligentes en ciudades inteligentes cuyo objetivo principal es la data de las variaciones eléctricas y niveles de luz de instalaciones cuyo funcionamiento resulta más óptimo. La implementación de mediciones de alta resolución temporal es crucial para optimizar la eficiencia energética de los sistemas de alumbrado público. La red LoRa se define como un protocolo WAN inalámbrico de baja potencia, larga distancia y baja tasa de transmisión de datos, que permite la interconexión de un elevado número de dispositivos mediante radiofrecuencia, siendo una alternativa ideal para aplicaciones de tipo ciudad inteligente por su bajo consumo y capacidad para establecer comunicaciones de largo alcance en interiores y exteriores, siendo la instalación exterior la que puede gestionar un mayor confort reduciendo el consumo producido en alumbrado público. Además de reportar los datos ambientales, estos dispositivos inalámbricos también escanean el consumo energético en las instalaciones del centro donde se encuentran situados, de esta forma no sólo reducen el consumo de energía, sino que optimizan el uso de recursos energéticos en la instalación así prolongando el tiempo de la instalación (F. Sánchez Sutil, 2020).

Con este propósito, se desarrolló un sistema de notificaciones de bajo costo y se evaluó con éxito mediante el desarrollo de tres dispositivos, el dispositivo de medición y control para luces de calle (MCDSL), dispositivo de medición de nivel de luz (LLMD) y Gateway LoRa network (GWLN), basado en la electrónica de código abierto de Arduino (F. Sánchez Sutil, 2020).

Sistema inteligente de control y monitoreo de alumbrado público mediante VANET. Este sistema tiene en cuenta el alto consumo energético destinado a la iluminación de vialidades en países. Su operativa permite el apagado de la luz pública donde no haya presencia vehicular, encendiéndola únicamente cuando el tránsito vehicular departamental esté presente. Con ello, se pretende un uso adecuado de la energía, un aumento en la longevidad del material, así como la disminución de contaminación. A través de redes ad-hoc vehiculares se logra el modelo en tiempo real de información acerca de la presencia, posición, dirección y velocidad de cada unidad automotriz (Samir A. Elsagheer Mohamed). Este sistema no necesita la implementación de nuevos dispositivos específicos, ya que se apoya en la infraestructura vehicular existente, aumentando la eficiencia del coste y la rapidez de su suministro.

Las redes vehiculares ad-hoc (VANET) permiten identificar en tiempo real la presencia de vehículos, así como su ubicación, dirección y velocidad. Una de las ventajas principales de este enfoque es que no requiere la instalación de nuevas redes o equipos específicos para el sistema, ya que aprovecha la infraestructura vehicular existente. Esto no solo reduce costos, sino que además acelera la implementación del sistema.

Este trabajo se centra en la propuesta de diferentes y posibles arquitecturas de este sistema. Los resultados muestran que la energía ahorrada puede alcanzar hasta un 65% y un aumento de la vida útil de las lámparas del 53% (Samir A. Elsagheer Mohamed, 2013).

Electricidad consumida estimada, costo y emisiones CO2 de diferentes partes del mundo				
Ubicación	Número de residentes	Número de KWh estimados por año	Costo estimado anual de alumbrado público	Emisiones de CO2 anual estimadas que genera el alumbrado público (en toneladas)
US	>68 millones	>300 billones	>\$18 billones	>150 millones
Unión Europea	>90 millones	>450 billones	>\$45.5 billones	>180 millones
Reino Unido	7.5 millones	>4 billones	>\$650 millones	>1.9 millones
Francia	8.6 millones	5.3 billones	\$520 millones	>583,000
Los Ángeles	220,000	>100 millones	>\$17 millones	>60,000
París	170,000	>80 millones	>\$10.2 millones	>\$10.2 millones

Tabla 4.2. Elaboración propia basada en A. Elsasheer Mohamed, 2013.

Para simplificar, se supone que el flujo vehicular entre las 5:00 p.m. y las 9:00 p.m. es elevado, por lo que cada sector de la carretera puede registrar al menos un vehículo con una probabilidad de 0.9. Entre las 9:00 p.m. y las 11:00 p.m., el flujo disminuye, y la probabilidad de encontrar un vehículo en un sector es de 0.30. Finalmente, de las 11:00 p.m. a las 6:00 a.m., la probabilidad se reduce a 0.05. La duración estimada del alumbrado público es de 13 horas diarias. Aunque estos supuestos se emplean únicamente con fines de validación, se aproximan a situaciones reales y permiten demostrar la validez y utilidad del sistema. No obstante, en la práctica, las ganancias pueden ser menores a las obtenidas en la simulación. En cualquier caso, bajo condiciones similares, es posible alcanzar beneficios variables según los parámetros elegidos (Samir A. Elsasheer Mohamed, 2013).

De manera complementaria, el ahorro de energía puede calcularse a partir de la siguiente ecuación simplificada:

$$\text{Ahorro de energía:} = \frac{13 - 4 \times 0.9 - 2 \times 0.3 - 7 \times 0.05}{13} \times 100 = 65\%$$

La vida útil típica de las lámparas LED es de 50 000 horas. Por lo tanto, al considerar este incremento, la vida útil de las lámparas se estima en aproximadamente 75 000 horas. Este aumento repercute directamente en la reducción del costo total de mantenimiento de los sistemas de iluminación vial. Cabe señalar que, en el caso de las lámparas HID, la vida útil sí se ve afectada por el número de encendidos. Sin embargo, para las lámparas LED, debido al uso de balastos electrónicos, dicho efecto resulta mínimo en comparación con la extensión del periodo de operación (Samir A. Elsasheer Mohamed, 2013) (Véase la tabla 4.3).

Características	Incandescente	Halógeno	Fluorescente	Lámparas compactas fluorescentes	LED	Descarga
Tiempo de vida típico (h)	1,000	2,000	10,000–15,000	8,000–15,000	50,000	5,000–20,000

Eficiencia (lm/W)	7–17	25	60–100	45–60	20–85	70–150
Tiempo de encendido (s)	0.1	0.1	1 (antiguos más lentos)	1	0.01	15–30
Tiempo para máxima luminosidad (s)	1	1	Unos segundos	>120	0.01	30
Posibilidad de atenuación	Sí	Muy poco	Algunos modelos	Modelos especiales	Sí	No
Parpadeo	Mínimo	Mínimo	En modelos antiguos	No	No	Sí
Fin de vida útil	Desecho	Desecho	Reciclable	Reciclable	Reciclable	Reciclable

Tabla 4.3. Elaboración propia basada en Samir A. Elsaygheer Mohamed, 2013.

Por la parte de blockchain existen los siguientes antecedentes:

La estructura segura del modelo de comercio de energía (SETM) se apoya en el blockchain para controlar por sistema, por medio de un agente de multi interacción de administración, diversos elementos como los consumidores y la parte de la producción de energía eléctrica (Hoon Ko,2021). Véase la figura 4.6.

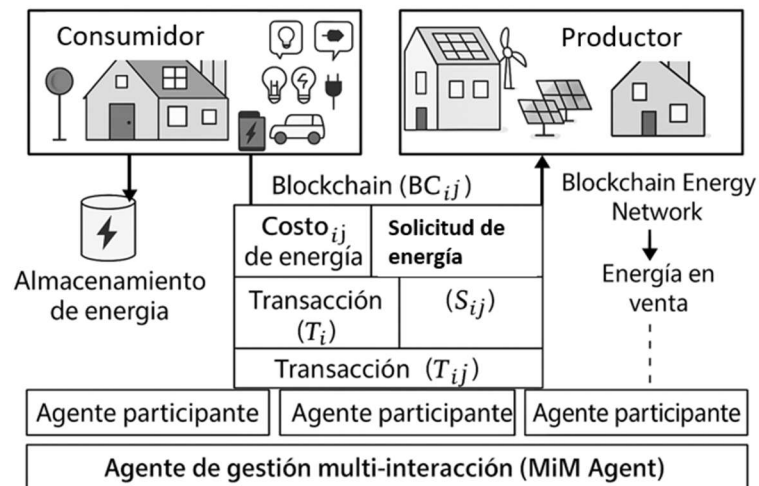


Figura 4.6. Representación del SETM (Hoon Ko,2021).

La siguiente aplicación de caso orientada a energías de uso compartido en el ámbito público es la energía gestionada mediante blockchain para comunidades públicas. En este caso, los procesos relacionados con la gestión de la energía de la comunidad son mediados por contratos inteligentes y/o bases de datos distribuidas. Como consecuencia, las interacciones necesarias para la utilización y consenso de la energía emplean diferentes mecanismos de control. Así, este modelo también es conocido como LEC de Comunidad Administrada (Marco Galici, 2021) (ver Figura 4.7).



Figura 4.7. Arquitectura de energía local de comunidad administrada (LEC) (Marco Galici, 2021).

Otra posibilidad de transacción de electricidad de microrredes apoyada en blockchain y subasta doble continua requiere de activos como detalles del mercado para la transacción a través de firmas digitales entre los proveedores de electricidad y los demandadores como en la presente figura 4.8. (Jian Wang, 2017).

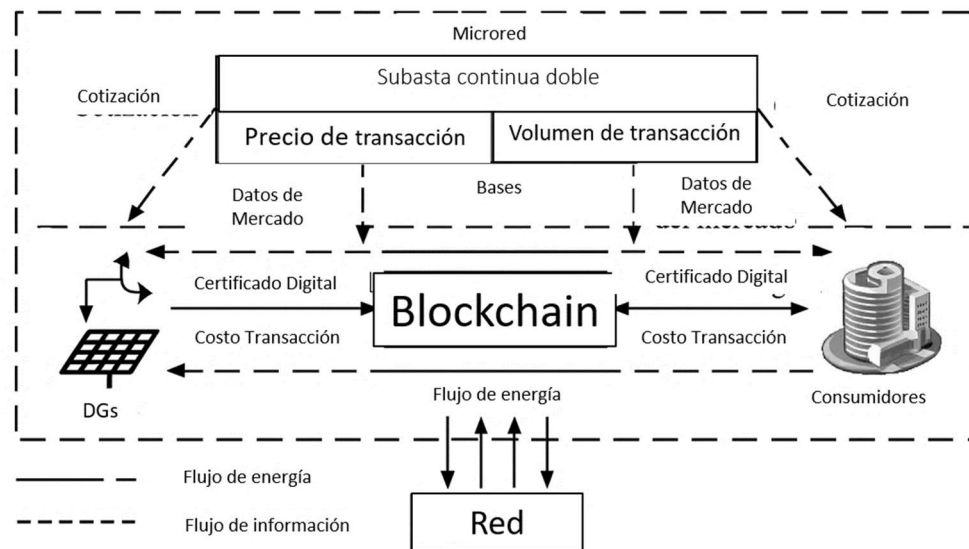


Figura 4.8. Estructura general de las transacciones de electricidad en microrredes por medio de blockchain (Jian Wang, 2017).

También existe lo que se conoce como “estudio sobre la mejora del rendimiento de la seguridad de las redes inteligentes y la perspectiva de las redes inteligentes de blockchain” en el cual se consideran aspectos de seguridad para los sistemas AMI y Smartgrid y cómo este interactúa con los blockchain. Un ejemplo es el diagrama de caso de uso se muestra a en la figura 4.9 (Seong-Kyu Kim, 2018).

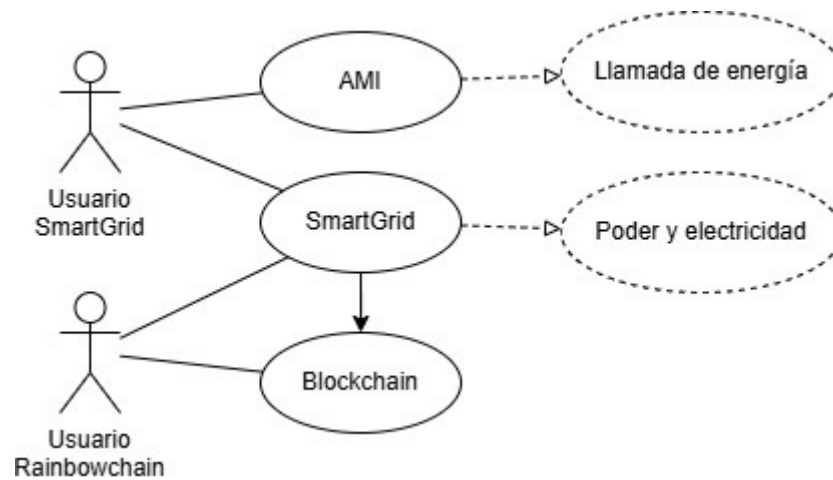


Figura 4.9. Estudio sobre la mejora del rendimiento de la seguridad de las redes inteligentes y la perspectiva de las redes inteligentes de blockchain (Seong-Kyu Kim, 2018).

En el último decenio se ha desarrollado e implementado el uso de la tecnología Blockchain en sistemas de energía sostenible, y en su trabajo abordan varios elementos del blockchain en el amplio campo de la sustentabilidad y cómo esta mejora el uso continuo y puede estar enlazada con estos diversos elementos como transacciones de energía, seguridad física de la información, certificación y tratamiento de emisiones de carbono, plantas virtuales de poder, sinergia de varios elementos de energía, respuesta a la demanda entre otros (Jiani Wu, 2018). Véase la figura 4.10.



Figura 4.10. Aplicación de la tecnología blockchain en sistemas energéticos sostenibles: una visión general (Jiani Wu, 2018).

También se han desarrollado conceptos orientados a la construcción de comunidades de usuarios para la gestión de energía en mercados abiertos. En este modelo se consideran elementos como plataformas de Internet of Things (IoT), medidores inteligentes, aplicaciones de gamificación (estrategias de motivación basadas en dinámicas de juego) y, en el caso de los mercados eléctricos, las regulaciones y reservas correspondientes. El blockchain interviene en la gestión de las transacciones financieras de

estos elementos, otorgando certeza y transparencia a todas las partes involucradas (Joao C. Ferreira, 2018) (véase la Figura 4.11).

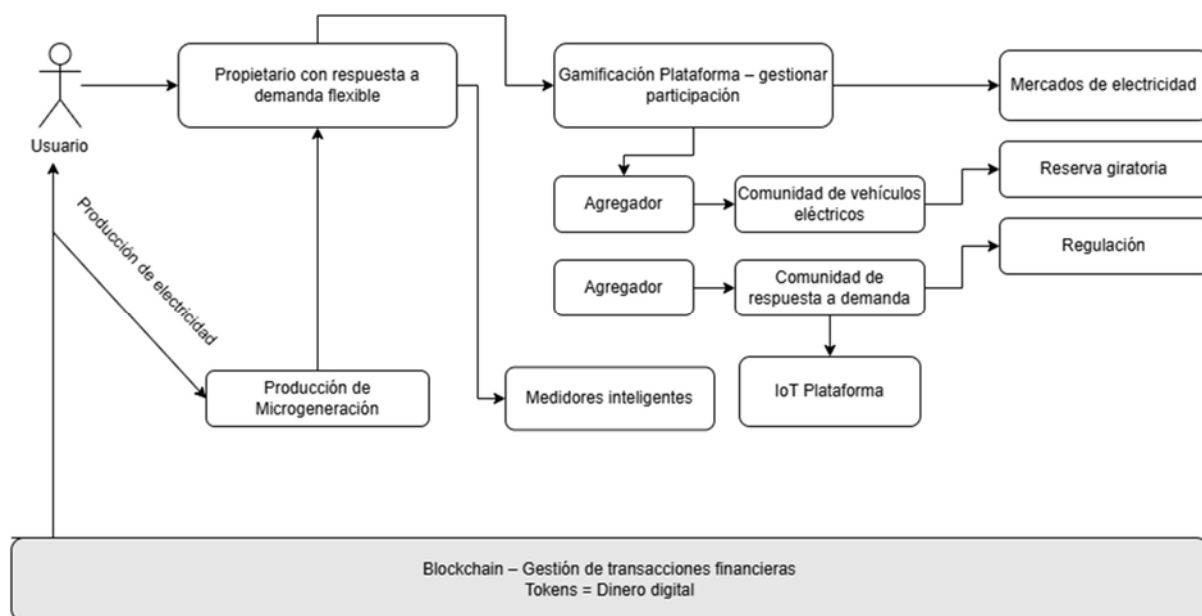


Figura 4.11. Construyendo una comunidad de usuarios para la energía de mercado abierto, (Joao C. Ferreira, 2018).

Se hace una propuesta de implementar blockchain en sistemas de transmisión de energía con gestión de congestión y bajo un marco de 3 capas, la capa blockchain que se encarga de la coordinación de la comunidad, la capa de detección que está compuesta por los equipos de los clientes de la micro-red y la capa de datos que hace alusión a equipos y controladores pertenecientes a Smartgrids o AMIs, donde a estos equipos de la capa de detección acceden en conjunto realizando transacciones entre usuarios. Esta propuesta es presentada en el trabajo de Moslem Dehghani (2020) como se muestra en la figura 4.12.

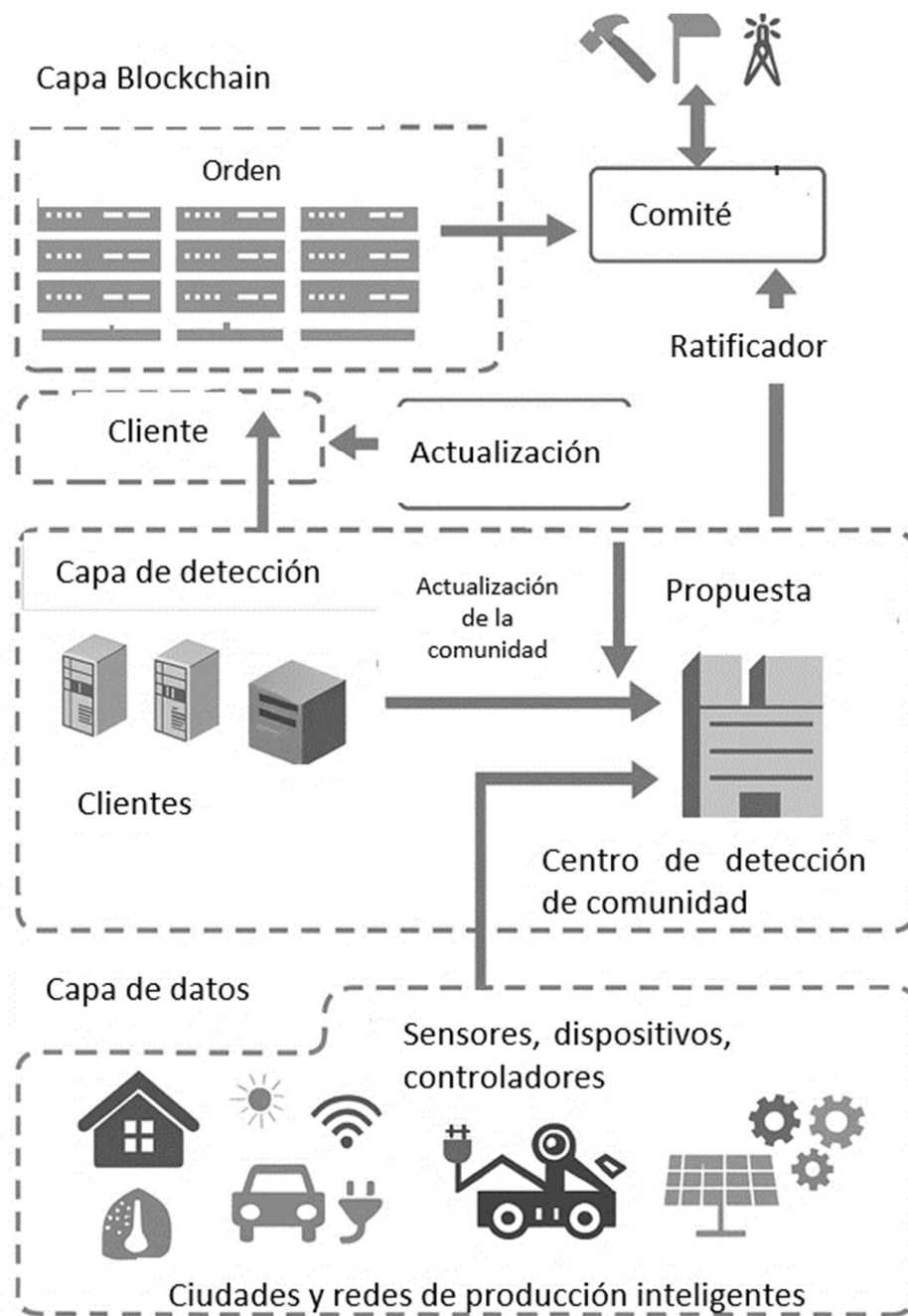


Figura 4.12. Protección del intercambio de datos basada en blockchain en un sistema de transmisión de energía considerando la gestión de la congestión y el bienestar social (Moslem Dehghani, 2020).

El blockchain también se utiliza en modelos de energía de comunidad, en el cual hace la función de puente entre las microgrids conformadas por AMI, Sensores de nodo, sistemas de almacenamiento y conectando con los consumidores locales según el flujo de energía (Ayude Swain, 2021) (véase la figura 4.13).

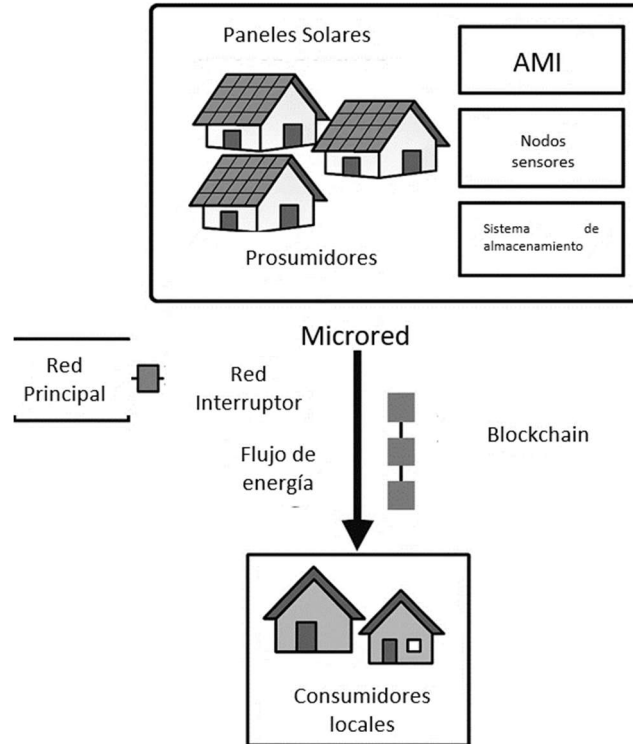


Figura 4.13. Un sistema de suministro de energía optimizado y descentralizado para ciudades inteligentes (Ayude Swain, 2021).

En el trabajo de Inteligencia Artificial en la Operación de Redes Eléctricas. Aplicación a sistemas aislados” se propone estudiar y valorar la utilización de técnicas de inteligencia artificial, particularmente la teoría de agentes y las aproximaciones de sistemas basados en conocimiento para el diseño, gestión y evaluación de redes eléctricas (Santiago Padrón, 2015).

Por la parte de metodología se tiene el empleo de la cadena de bloques por lo que será expuesta su definición y características, la cual se presenta en la guía de definición como el nuevo libro mayor inmutable y compartido que utiliza una red de negocios para registrar transacciones y rastrear activos. Los activos pueden ser físicos (una vivienda, un vehículo, un billete, un terreno) o digitales (una red de patentes, una propiedad intelectual, un derecho de autor, una marca). En una red de blockchain, puede intercambiarse con el mismo nivel de confianza cualquier cosa que tenga un valor monetario, reduciendo costos y riesgos para las partes involucradas (IBM, 2025).

En abril de 2016 se organizó un evento para demostrar la viabilidad de una red energética habilitada por blockchain, a través de la prueba denominada Brooklyn Microgrid, un proyecto impulsado por la empresa energética LO3 y Siemens en Nueva York. En esta demostración se evidenció la dispersión de la energía solar generada y la forma en que se comercializa entre los vecinos que utilizan tecnología blockchain basada en Ethereum. Algunos edificios privados contaban con instalaciones solares en sus azoteas, y la energía excedente era transferida a otros edificios del vecindario mediante una transacción descentralizada, tal como se ilustra en la Figura 4.17, sin necesidad de que una empresa de servicios públicos actuara como intermediaria (Okoye et al., 2017).

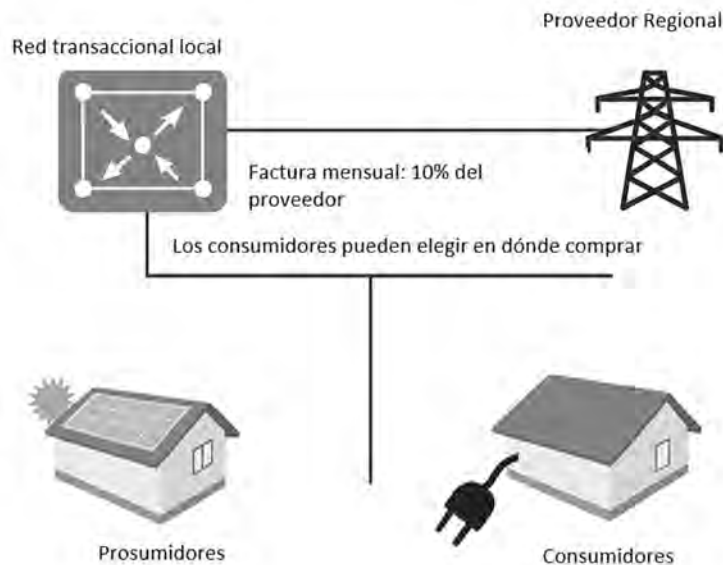


Figura 4.14. La plataforma de comercio de energía de Brooklyn (Okoye et al., 2017).

El protocolo de transacción y la elección de los campos de datos son flexibles y dependen del consenso del consorcio. Todo el libro mayor de transacciones está encriptado de forma robusta, utilizando cifras alfanuméricas de blockchain generadas por software que corresponden de forma única a cada bloque, como se observa en la ilustración del apartado. Estas cifras encadenan cada bloque al inmediatamente siguiente y de forma secuencial a las transacciones que contiene. Según explican Okoye et al (2017) en su estudio, en sí mismas, estas cifras encriptadas no son más que una cadena alfanumérica haciendo referencia al bloque, y son conocidas popularmente como Hash.

Cada bloque contiene su hash y el del inmediatamente anterior bloque en el orden de transacción excepto el primer bloque que está conectado directamente con el origen del sistema. Por lo tanto, para cualquier mutilación de información que ocurra, el atacante debe alterar el hash de los bloques completos, así como requerir todo el tiempo necesario para calcular la prueba de trabajo inherente, una segunda medida de seguridad de nivel asociado a la generación de nuevos hashes. Así, la seguridad de los prosumidores y los consumidores están garantizadas (Okoye et al., 2017)(véase la figura 4.15).

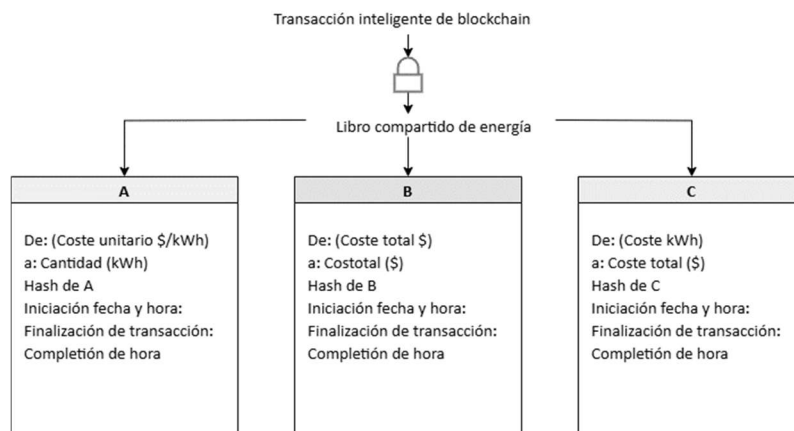


Figura 4.15. Microrred: transacciones inteligentes en blockchain (Okoye et al., 2017).

Consorcio de transacciones en blockchain. Para explicar las características inherentes de una blockchain mejorada aplicada a transacciones en microrredes, el autor propone un modelo de transacción de energía de microrred (Modelo 1, Figura 4.16). En este esquema se contemplan dos tipos de permisos: pleno y parcial. El permiso pleno corresponde al modelo convencional y otorga la facultad de validar bloques creados. El radio de cada esfera representa el retraso asociado a la actividad de los participantes, que incluye tanto la validación como la demora en la creación de bloques. En este contexto, Power Ledger emplea un mecanismo de validación basado en prueba de participación (Proof of Stake), integrado en su proceso de transacción (Okoye et al., 2017).

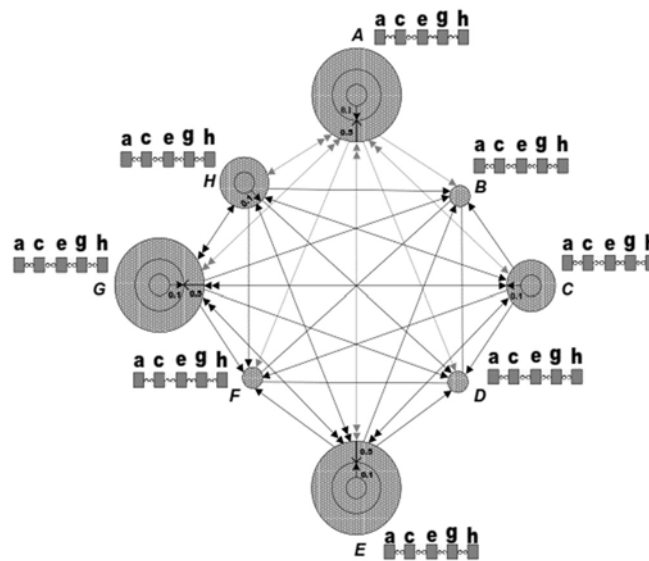


Figura 4.16. Modelo de transacción blockchain de permiso parcial de microrred (Okoye et al., 2017).

LEYENDA

A = participante en blockchain,

a = bloque de transacción creado por el participante A

a c e g h = Transacción Blockchain

→ = Notificación de creación de bloque (BCN) recibida

→ = BCN y solicitud de validación recibidas

→ = Permiso de validación de bloque y procesamiento

→ = Solicitud de validación enviada

Nota: Creación de bloque y validación son eventos mutuamente excluyentes

→ = Enlace de transacción de energía

Transacción pública de cadena de bloques. Con el fin de describir la velocidad de transacción obtenida mediante la optimización del protocolo de permisos en el Modelo 1, se presenta un segundo modelo convencional de blockchain (Modelo 2), en el cual todos los participantes disponen de permisos de transacción completos. Ambos modelos se comparan en la Figura 4.18 (Okoye et al., 2017).

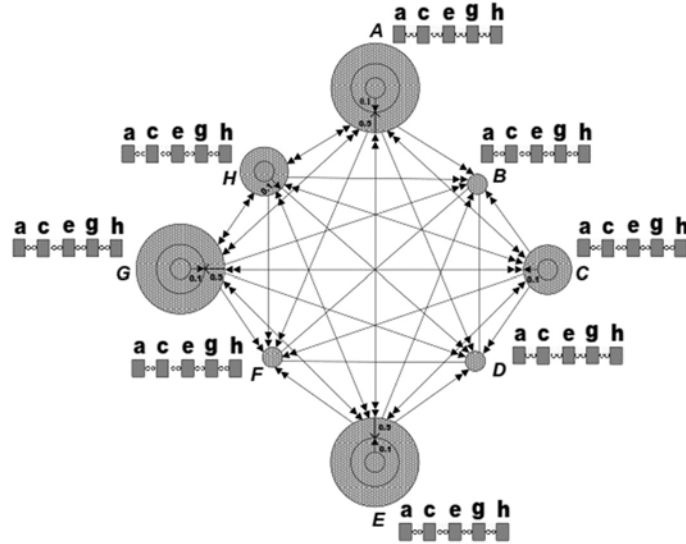


Figura 4.18. Modelo de transacción blockchain de permiso parcial de microrred (Okoye et al., 2017).

Un segundo estudio importante evalúa la arquitectura y el rendimiento del comercio de energía entre pares basado en blockchain. La adopción de fuentes renovables como paneles solares, turbinas eólicas y vehículos eléctricos enchufables ha permitido el surgimiento de pequeños generadores de energía conocidos como prosumidores. Estos prosumidores pueden vender su energía sobrante a los vecinos, a la red de distribución o a la red eléctrica. Esto es lo que se define como comercio entre pares de energía (P2P-ET) (Abdella et al., 2021).

Los sistemas actuales de comercio de energía suelen estar sustentados en una arquitectura centralizada, donde una autoridad única controla el proceso completo. Este modelo presenta limitaciones significativas, como cuellos de botella en la comunicación, vulnerabilidad al fallo de un único punto de control, así como riesgos en materia de seguridad y privacidad. Además, los tiempos de liquidación de pagos pueden superar un mes, incluso con un número reducido de participantes, situación que se agravaría en escenarios realistas con decenas de miles de nodos P2P-ET (Abdella et al., 2021).

Aunque se han realizado esfuerzos hacia modelos parcialmente descentralizados (en los cuales el sistema se divide en localidades administradas por coordinadores como agregadores o servicios públicos), estas propuestas aún reproducen los problemas del modelo centralizado, al depender de un único coordinador (Abdella et al., 2021).

Otra debilidad identificada es la falta de transparencia ya que solo el operador central tiene una capacidad completa de observar todas las negociaciones. Por tanto, al no existir acceso a la información de dichas transacciones, la competencia se vería reducida y los precios de la electricidad podrían aumentar. Se ha apuntado que un esquema de transparencia de información controlada donde las identidades de los agentes estén protegidas mejoraría el funcionamiento de los mercados eléctricos.

Para superar las limitaciones, blockchain surge como una tecnología emergente. La arquitectura descentralizada no tiene un único punto de falla y no tiene cuellos de botella de comunicación

inherentes. Además, blockchain permite transacciones electrónicas peer to peer rápidas y seguras entre partes confiables sin requerir un tercero confiable como intermediario. Identificar a los pares utilizando claves públicas en lugar de información personal identificable proporciona un mayor grado de anonimato y privacidad, reforzando así su potencial como infraestructura para el comercio de energía entre pares. (Abdella et al., 2021)

Una definición más amplia se puede encontrar en Zhou et al., donde se establece que las microrredes de Energía, por su naturaleza distribuida, no ofrecen un marco de confianza absoluto entre los nodos, así como tampoco garantizan los derechos de los actores consensuando acuerdos energéticos no óptimos. Asimismo, es ineficiente y con poca transparencia, dificultando la trazabilidad de todos los procesos. En este sentido, considera que la integración de blockchain en microrredes de Energía/poderes resuelven estas inquietudes al ser un sistema que proporciona confianza e integridad de los datos mediante un procesamiento y almacenamiento distribuido. Blockchain propicia así una arquitectura ecológica/ambiental abierta/abierto, transparente, perseguible/escuchable, realizable y confiable/fiable, facilitando la implementación y operatividad del modelo negocio y el desarrollo sostenible de las MR (Zhou, 2020).

Bitcoin se basa en la implementación de un sistema de contabilidad distribuido mediante una cadena de bloques, que consiste en un libro de contabilidad consensuado por todos los participantes que resuelve el problema práctico del doble gasto y el llamado problema de los generales bizantinos mediante mecanismos criptográficos y arquitecturas distribuidas y paradigmas computacionales. El problema de los generales bizantinos parte de la premisa de que el canal de comunicación es seguro y aborda el consenso y la tolerancia a fallos, lo que representa un problema de confianza en el que cada participante actúa de forma independiente. En este sentido, la cadena de bloques utiliza algoritmos de consenso distribuido, criptografía asimétrica y mecanismos de autenticación para establecer confianza entre pares y una lógica descentralizada en la que no se deposita confianza en los nodos, sino en los mecanismos que regulan el funcionamiento del sistema. En este sentido, la cadena de bloques se caracteriza así por dos funciones fundamentales: la diseminación y el consenso, así como por la adición de una tercera función derivada de la primera, denominada también la función de transferencia de valor (Zhou, 2020).

Para estructurar un nodo distribuido bajo un mecanismo de confianza mutua, la blockchain puede clasificarse en tres categorías (Zhou, 2020):

- Blockchain pública. Es la más utilizada y permite la participación abierta de instituciones e individuos en transacciones y confirmaciones. Se caracteriza por una descentralización total, sin intervención de terceros, y emplea criptografía para garantizar que las transacciones no sean manipuladas, asegurando su verificación y validación.
- Blockchain de consorcio (o de alianza). Su uso está restringido a un grupo de participantes organizados bajo reglas comunes. Los permisos de lectura, escritura y las normas de contabilidad se definen por la propia alianza. Destaca por su mayor velocidad de transacción y buena escalabilidad.
- Blockchain privada. Se orienta a la privacidad y restringe el acceso a una única organización o institución. Los nodos son limitados y controlados, lo que proporciona un alto nivel de seguridad. En comparación con una base de datos tradicional, permite detectar con mayor facilidad manipulaciones o alteraciones en los registros. No obstante, en la práctica, cuando una sola

blockchain resulta insuficiente para cubrir la demanda, puede integrarse con otras redes para formar un sistema híbrido.

Desde una perspectiva técnica, el llamado principio de la “cadena más larga” se tumba en la base del protocolo de consenso distribuido. Y es con ello como el sistema blockchain cumple con los requerimientos de las operaciones de transacción y consulta sobre la capa de datos en sistemas como el de Bitcoin. Un dato a mencionar, es que en la actualidad diversas plataformas blockchain ya incluyen un segundo plano para operaciones de ejecución de programas de usuario sobre su capa de estado, para lo cual emplean algoritmos como el de ejecución de contratos inteligentes (smart contracts). En este protocolo, la ejecución de programas de usuario se encuentra automatizada, donde cada resultado se encuentra grabado de forma inmutable. Con ello, se garantiza la trazabilidad de los datos y se convierte en una alternativa a diversos problemas de gestión y verificación (Zhou, 2020) de tipo específico.

El contenido conceptual de la energía de blockchain está íntimamente relacionado con la construcción de la red eléctrica inteligente, la promoción de la economía digital y el fomento del progreso económico y social. Dado que la energía de la tecnología blockchain tiene tanto significados tecnológicos como conceptuales.

En el plano técnico, blockchain integra diversas herramientas informáticas, entre ellas el almacenamiento y la distribución de datos, la transmisión peer-to-peer, los mecanismos de consenso y los algoritmos de encriptación. Esta combinación permite gestionar la información de manera ordenada y garantizar su inmutabilidad.

La adopción de estas plataformas participantes requiere redefinir la confianza y la interacción entre los actores involucrados. En este aspecto, las plataformas blockchain ofrecen un campo conceptual en el que la capacidad de participación de los usuarios se refuerza a través de reglas de consenso y mecanismos de incentivos que garantizan la cooperación de bajo costo en entornos competitivos de desconfianza. De esta manera, la tecnología blockchain proporciona un nuevo modelo de confianza mutua entre los diferentes agentes de los sistemas energéticos distribuidos.

La cadena de bloques energética es un nuevo modelo de desarrollo de la industria de la energía basado en la cadena de bloques, que es la mejor integración de los flujos de energía, datos y comercio en una plataforma de ecosistema digital. Rompiendo las relaciones de producción tradicionales en el campo de la energía, con el sistema abierto y la colaboración entre pares como la principal característica, promoviendo la economía digital basada en activos y datos, impulsando la aparición de nuevos modelos comerciales, abiertos e integrados, y promoviendo la construcción de una economía digital integrada centrada en la energía Zhang et al. (2021).

La conexión entre blockchain y el sector energético puede explicarse a partir de la tecnología subyacente que ambas comparten: el almacenamiento distribuido de registros. En el caso de la blockchain energética, esta se orienta a resolver los problemas de confianza en el intercambio y la colaboración entre múltiples agentes, lo que implica la necesidad de almacenar información interactiva entre las entidades involucradas. En otras palabras, tanto la blockchain aplicada a la energía como la blockchain en general dependen de la misma tecnología de registros distribuidos para garantizar integridad y transparencia (Zhang et al., 2021).

Esta opción en el negocio tiene como objetivo principal la resolución práctica del problema de la confianza, que, como se sabe, es la exigencia más costosa para la creación de nuevos modelos de negocio o la reducción de costes operativos asociados con la existencia de múltiples partes interesadas. Este último esquema representa un sistema fundamental para la creación de modelos de negocio valiosos que genere un impacto positivo en el ámbito económico y social (Zhang et al., 2021).

La construcción de modelos basados en blockchain, tanto en el sector energético como en otros ámbitos, responde a la necesidad de generar confianza entre las entidades participantes. En este sentido, aunque los objetivos son comunes, los contextos difieren. En el caso energético, los actores incluyen productores, consumidores, agencias reguladoras e instancias gubernamentales, lo que introduce dinámicas de desigualdad estructural entre los participantes (Zhang et al., 2021).

Es por ello que la aplicación de blockchain en el sector energético debe tener en cuenta estas asimetrías, lo que la distingue fundamentalmente de otros usos más generales de la tecnología. Mientras que en una cadena de bloques pública el mecanismo de consenso se basa en una igualdad inicial de los actores, en el sector energético estas interacciones están condicionadas por una asimetría subyacente.

Asimismo, por tratarse de una infraestructura estratégica, la energía se encuentra muchas veces bajo control estatal. Esto imposibilita la aplicación del blockchain público, que se basa en el anonimato y el cambio de estatus de los participantes, cuestiones que son imposibles de aceptar en términos de soberanía y control nacional. Por ende, el blockchain de consorcio presenta un balance más adecuado entre transparencia, gobernanza y regulación que su contraparte pública, razones por las cuales es la tecnología con el potencial más prometedor para el sector energético (Zhang et al., 2021).

En tercer lugar, los protocolos de consenso existentes no satisfacen plenamente los requisitos específicos de los sistemas energéticos. Se diseñan fundamentalmente con el objetivo de dividir el control del sistema entre el mayor número posible de nodos, forjando así un entorno de control mutuo. Sin embargo, la motivación en el sector energético es reducir el costo del consumo de recursos energéticos, y para ello se requiere un mayor control central, lo que hace que los protocolos de consenso descentralizados no sean óptimos para su uso en este sector (Zhang et al., 2021).

La aplicación de blockchain en el mercado eléctrico se ha orientado principalmente a tres ámbitos: (1) la liquidación de transacciones, (2) la gestión de contratos, y (3) las transacciones peer-to-peer en microrredes. Dado que blockchain tiene su origen en Bitcoin, es posible virtualizar las transacciones energéticas como activos digitales y publicarlas en la red. En este esquema, los usuarios pueden intercambiar energía eléctrica directamente dentro de un sistema blockchain diseñado para el sector, utilizando criptomonedas como medio de pago que representa el valor de las operaciones (Zhang et al., 2021).

La transacción incluye datos como el identificador del vendedor y del comprador, la cantidad de energía ofrecida y demandada, y el precio unitario. Cada transacción es almacenada con un hash aleatorio y una marca de tiempo haciendo uso de una función hash criptográfica, permitiendo la trazabilidad y el aseguramiento de la información. Los interesados firman las transacciones mediante su clave privada, garantizando la autenticidad de las operaciones. Como prueba del cumplimiento de contrato, una de las partes puede proporcionar evidencia de la transacción con el hash y su firma, permitiendo la

generación de credenciales que asocien a la parte incumplidora, junto con la clave pública. El sistema, tras recibir esta cuenta, envía a la cuenta como parte inscripción al sistema y credenciales, a un u otro participante, y con el procedimiento, asociación, la parte que muestra incumplimiento hace la solicitud de credenciales asociadas a la parte incumplidora, bajando su escalafón crediticio si esta operación ocurre (Zhang et al., 2021).

Los modelos de mercados eléctricos han usado en su formulación los sistemas de registros distribuidos. Esto porque los sistemas de registros distribuidos aportan una plataforma de ejecución segura, sin la necesidad de confiar en un intermediario (Cohen et al., 2022). Además, que los datos de las diversas transacciones sean replicados entre todos los usuarios garantiza que no se realicen manipulaciones en un único punto de control. Por lo tanto, el sistema reduce los problemas de transparencia, seguridad y viabilidad ofrecidos por los mercados eléctricos descentralizados en sí mismos (Zhang et al., 2021).

A partir de la etapa de contrato inteligente, se lleva a cabo el pago y la respectiva compensación. Donde el blockchain posee la información del cliente, la consulta la puede realizar el cliente en cualquier momento a través de su clave privada; sin embargo, los permisos de acceso están restringidos según los niveles ofrecidos, lo que permite cumplir con las características de privacidad de la microrred. Las características de trazabilidad e inmutabilidad de Blockchain brindan una fuente de datos fiable y precisa sobre la operación de distribución de energía en la microrred inteligente.

En las microrredes, la energía de recursos distribuidos es generada principalmente por generadores fotovoltaicos, eólicos y otras fuentes de energía renovable. Sin embargo, la naturaleza intermitente y variable de estos recursos, junto con factores externos, afecta principalmente la estabilidad de la red, lo que requiere un control adicional durante los procesos de despacho eléctrico. Las prácticas óptimas para el despacho en este contexto consideran las predicciones históricas de generación y demanda para ofrecer un perfil de despacho más estable a los usuarios de alta carga y, mejor aún, manteniéndose como un algoritmo de despacho óptimo de procedimiento justo por recursos, como se muestra en la Figura 4.18 (Zhang et al., 2021).

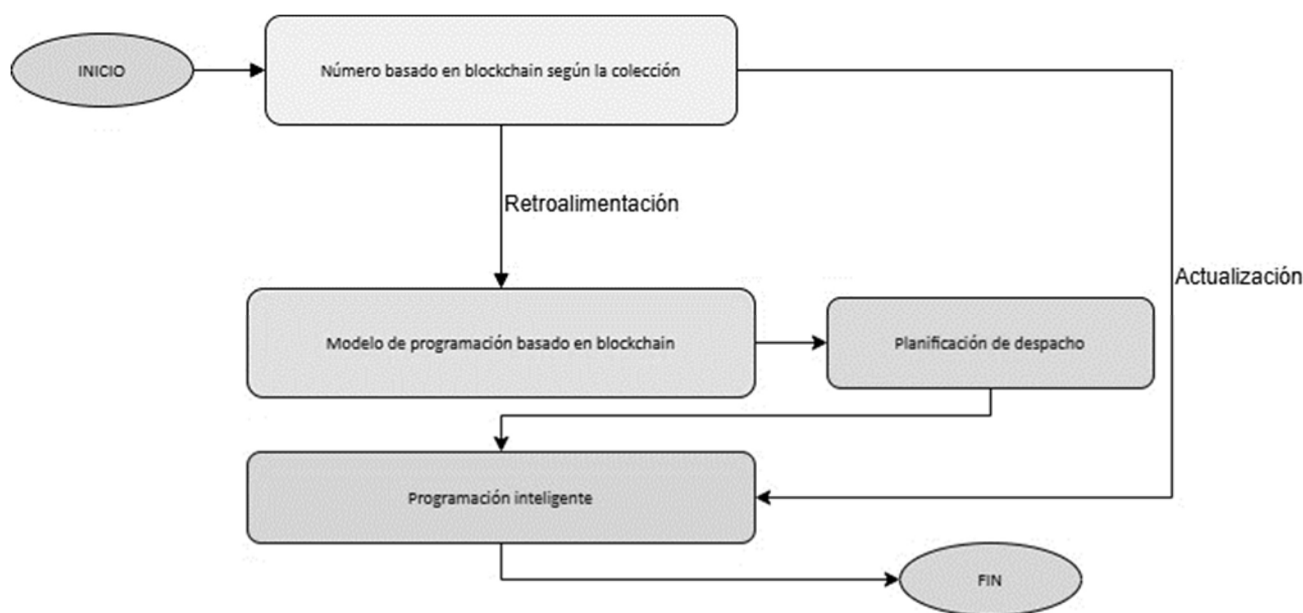


Figura 4.18. Otorgar prioridad a los usuarios en la compra de electricidad (Zhang et al., 2021).

Evidentemente, el comercio de energía P2P basado en blockchain se ve beneficiado por la digitalización del sector energético. Esta se traduce en el tratamiento y procesamiento de los datos informáticos generados, almacenados y gestionados que ocurren a lo largo de todo el ciclo de oferta y demanda (esfera de generación, redes de transporte y distribución, prosumidores, edificios, comercio minorista o servicios públicos). La digitalización reviste ventajas para cada una de estas partes al tiempo que presenta menores riesgos, traumas o dificultades. Las consecuencias serían mayores en relación con la ciberseguridad, la productividad, la accesibilidad y la sostenibilidad de los sistemas, aunque también se llevarían la palma en positivo para el conjunto de sectores intervinientes en los sistemas energéticos. En consecuencia, el objetivo declarado en esta revisión es el correcto funcionamiento del comercio de energía P2P impulsado por la aparición y expansión de la valiosísima digitalización del sector energético, el uso de la tecnología blockchain, así como de los contratos inteligentes. Estas últimas nociones están cada vez más presentes como elementos estratégicos o muy relevantes a la hora de articular un cambio estructural necesario y prioritario en el seno del actual sistema energético incapaz de afrontar de manera competitiva una demanda mayor al precio (Korkmaz et al., 2021).

La industria energética está a las puertas de la digitalización y, por lo tanto, de la destrucción de las fronteras entre mercados. Esto presenta una oportunidad para que los usuarios participen en el equilibrio activo entre la oferta y la demanda, así como en la gradual descongestión de la red y la integración de recursos energéticos distribuidos. Por otro lado, la industria energética distribuida demanda que los datos de disponibilidad de generación y consumo estén disponibles en tiempo real en múltiples puntos de la red. Solo así podemos preservar el equilibrio e integridad de la red, así como minimizar las ineficiencias a un coste menor Korkmaz et al., 2021 (figura 4.19) .

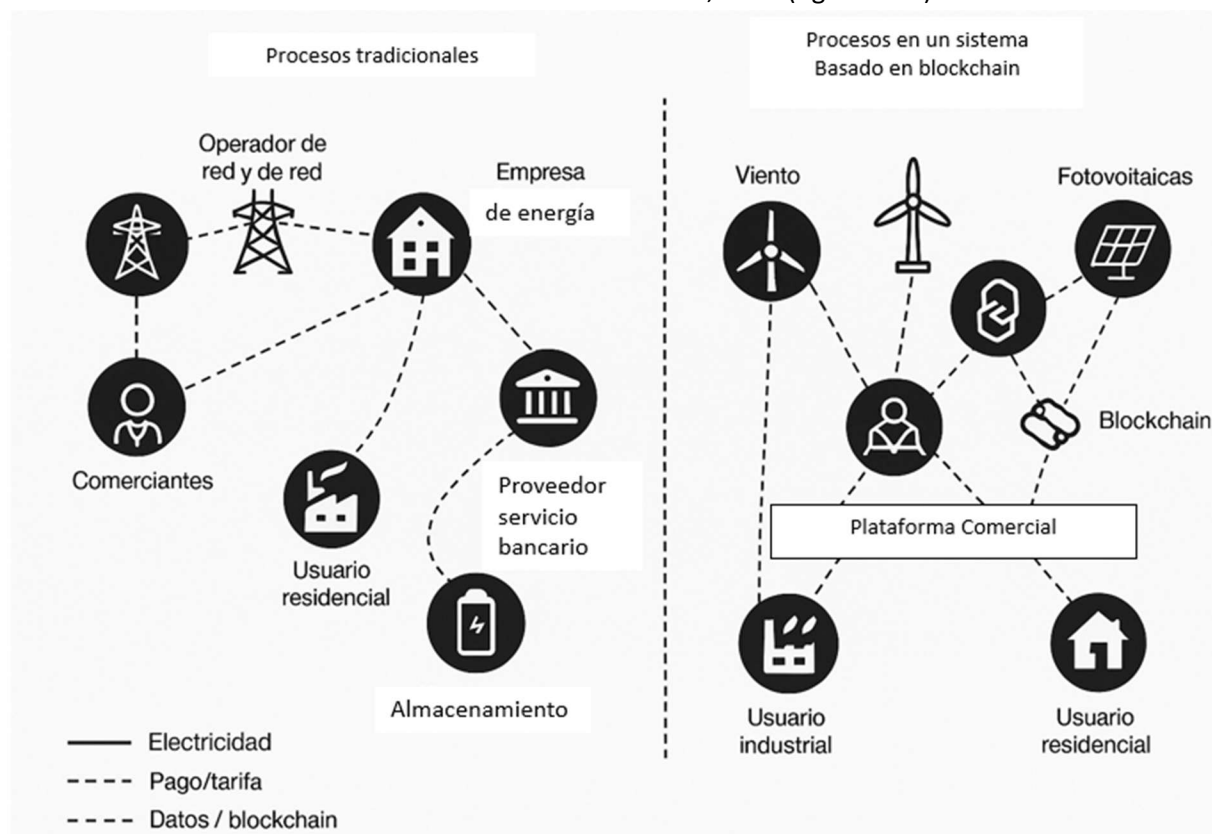


Figura 4.19. Muestra la diferencia entre la forma tradicional de comercialización de energía y la comercialización de energía descentralizada, basada en Korkmaz et al., 2021.

Blockchain, o cadena de bloques, es una tecnología que permite gestionar una base de datos de forma distribuida entre un conjunto de participantes. Usando criptografía, cada participante puede gestionar la base de datos de una forma segura, sin un control externo que imponga las reglas del registro. A pesar de ser esta la propiedad más característica y, a veces, la única que se menciona, no es la más relevante de la tecnología (Korkmaz et al., 2021).

Se dice que las cadenas de bloques almacenan registros permanentes de las transacciones. Sin embargo, esta permanencia es dependiente de la robustez de la red. En el caso de blockchain, significa que toda la red debe validar cualquier modificación realizada sobre los datos. Esta condición, aunque puede ser fácil de eludir mediante técnicas como el 51% ataque, es en la práctica muy costosa de materializar. Por lo tanto, se dice que la confianza en la información está garantizada (Korkmaz et al., 2021).

Cada bloque almacena tres elementos fundamentales: (1) la información correspondiente a la transacción o evento, (2) su propio hash, y (3) el hash del bloque anterior. El hash constituye una huella digital única que identifica tanto al bloque como a todo su contenido. Una vez creado, cualquier modificación en la información altera inmediatamente el hash, lo que rompe la validez del bloque y de toda la cadena subsecuente (Korkmaz et al., 2021).

Esta tecnología proporciona un sistema de información compartida que permite transacciones directas y sin intermediarios entre partes que no se conocen entre sí. En el sector energético, la tecnología blockchain presenta un sistema de información distribuido que permite realizar transacciones seguras, directas y descentralizadas en plataformas de intercambio energético entre pares. (Korkmaz et al., 2021)

Las aplicaciones de blockchain son diversas, ya que la tecnología resulta aplicable a múltiples sectores. En términos generales, pueden clasificarse en dos grandes categorías: financieras y no financieras. A continuación, se destacan también algunos ejemplos específicos en el sector energético (Korkmaz et al., 2021).

A. Aplicaciones financieras

- Transacciones transfronterizas. Las transferencias de efectivo internacionales han tenido tradicionalmente procesos costosos y prolongados, siendo intermediadas por distintos bancos y sistemas de compensación. De forma reciente, la asociación alianza de la red SWIFT y el consorcio de blockchain Hyperledger Fabric está ayudando a reducir costos y tiempos por medio de la utilización de estos sistemas.
- Plataformas de financiamiento comercial. De forma reciente, algunos bancos han comenzado utilizando blockchain junto con la tecnología de contratos inteligentes para crear plataformas que faciliten la transacción segura entre sus miembros, aunque aún se encuentran en la etapa de prueba y pocos bancos están siendo reportados como participantes.
- Compensación y liquidación. Se considera que las capacidades de registro mayorista de blockchain han de servir de sistema para capitulación y liquidación, de forma manera más económica y eficiente para las instituciones financieras.

- Verificación de identidad digital. Algunas instituciones utilizan identificación basada en blockchain para la verificación segura de la identidad del cliente.
- Informes de crédito. Almacenar los datos crediticios de un individuo en un blockchain puede ofrecer un mayor nivel de certeza en comparación con una base de datos propietaria centralizada.

B. Aplicaciones no financieras

- Cadena de suministro. Usar una infraestructura blockchain puede ayudar a establecer un registro inmutable de los artículos de inventario que se pueden utilizar para rastrear los artículos a medida que se mueven a través de la cadena de suministro. Las prácticas de administración de cadena de suministro específicas pueden verse mejoradas por el uso de blockchain al garantizar un consenso entre los socios comerciales sobre el estado de los bienes, proporcionando una mayor mejor visibilidad de los bienes a los socios interesados, creando un registro inmutable del movimiento físico de los bienes a lo largo de la red para proporcionar una prueba de movimiento de bienes en tránsito y proporcionando la promoción de la importancia de la data usando mecanismos de incentivos.
- Expediente clínico. Blockchain se puede utilizar para almacenar el historial médico de un paciente de manera segura y encriptada, y el paciente puede otorgar acceso en línea a los médicos que necesiten esos registros. Esto protege la información del paciente de manera más segura que las bases de datos en los servidores locales de clínicas y hospitales.
- Voto. La votación mediante blockchain puede ayudar a eliminar el riesgo de fraude e irregularidades al usar el mismo software blockchain para contar los votos. Blockchain puede proporcionar un método de gestión de resultados más transparente.

C. Aplicaciones en el sector energético

- Gestión de redes. Blockchain contribuye a la organización descentralizada y a la administración de recursos energéticos distribuidos, mejorando la flexibilidad operativa y reduciendo la necesidad de costosos rediseños de infraestructura.
- Redes inteligentes y transferencia de datos. La tecnología puede integrarse con dispositivos inteligentes, facilitando la comunicación, el almacenamiento y la transmisión segura de datos energéticos.
- Comercio P2P y energía descentralizada. Permite el intercambio directo de energía en microrredes entre prosumidores y consumidores, así como transacciones de empresa a empresa (business-to-business, B2B).
- Medición, facturación y seguridad. Integrada con infraestructuras de medición avanzada, blockchain posibilita procesos de facturación automatizados y seguros para consumidores y generadores distribuidos.

El término contrato inteligente fue introducido por el informático y criptógrafo Nick Szabo, quien lo definió como “un conjunto de promesas, especificadas en forma digital, incluyendo los protocolos dentro de los cuales las partes cumplen dichas promesas”. Para explicar el concepto, Szabo lo comparó con una máquina expendedora, entendida como un contrato entre vendedor y comprador: el dispositivo mantiene asegurados tanto las monedas como los productos, y libera el artículo correspondiente una vez que se introduce la cantidad exacta.

Sin embargo, en esa época, la idea de aplicar dicha teoría a un programa en funcionamiento o incluso próximo seguía siendo sólo una posibilidad teórica. En un alarde de imaginación, Nick Szabo postula, en la década de los 90, un concepto de contrato digital basado en la aplicación de mecanismos de prueba que no requieran confianza entre las partes firmantes. Imaginaba que el contrato digital con esas especificaciones podría ser, con diferencia, muy superior al contrato en papel tradicional, pero requería un acuerdo entre las partes en la implementación de sistemas criptográficos necesarios para la verificación. Esa idea, aunque en la práctica no llegara a aterrizar, sentó las bases conceptuales de lo que hoy se conoce como contratos inteligentes. La aplicación de esa teoría en la práctica y con un uso extendido en entornos reales e independientes no sería posible hasta el momento de invención del blockchain, que habilitó su ejecución mediante registros distribuidos y mecanismos de consenso.

Un smart contract es un protocolo informático cuyo almacenamiento y ejecución se realiza en plataformas blockchain, con la finalidad de garantizar que se cumpla de manera automática, confiable y segura el contenido de un acuerdo o contrato celebrado entre dos o más partes, de acuerdo a las reglas establecidas por los algoritmos de consenso que rigen dicha plataforma. Un smart contract puede contener un contenido de naturaleza contractual de diverso tipo, dependiendo del lenguaje de programación que se utilice para dicha programación.

En la Figura 4.20 se presenta una comparación entre contratos tradicionales y contratos inteligentes, resaltando sus diferencias en términos de ejecución, seguridad y automatización (Korkmaz et al., 2021).

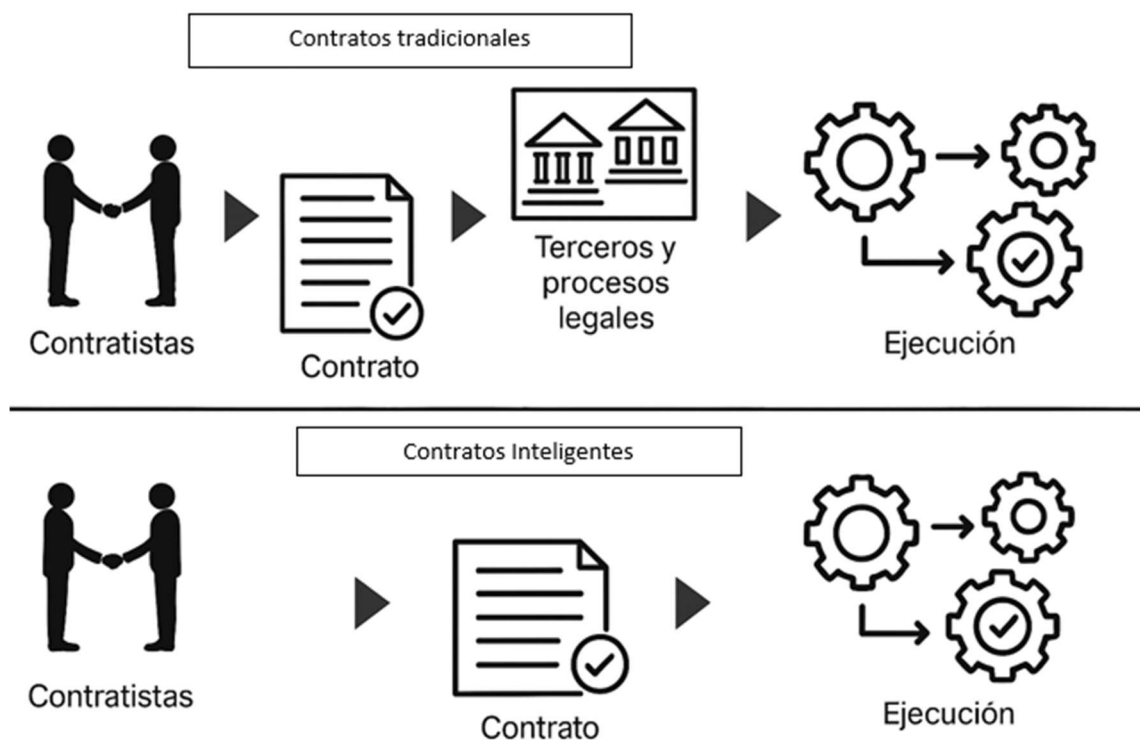


Figura 4.20. Contratos Tradicionales y Contratos Inteligentes (Korkmaz et al., 2021)

Bitcoin fue la primera criptomoneda, lanzada por Satoshi Nakamoto en 2008, que iniciaba un nuevo paradigma que posteriormente sería conocido como contratos inteligentes. Como prueba de ello, aunque su adopción y éxito para funciones monetarias la convirtieron en la criptomoneda más conocida, su usabilidad es bastante limitada. Procedente de la mente de Vitalik Buterin, la plataforma Ethereum fue presentada cinco años más tarde como un sistema más general capaz de cubrir todas las necesidades relacionadas con contratos que pudieran existir. Así, Ethereum es capaz de alojar aplicaciones descentralizadas y funcionamiento sobre blockchain de manera más amplia, lo que proporcionó un espacio más funcional para la creación e implementación de todo tipo de contratos inteligentes. De este modo, Ethereum es en la actualidad la plataforma principal es más desarrollada para la creación de contratos inteligentes, pero existen múltiples alternativas que están en auge y cada vez se están empleando más contratos en distintos sectores (Korkmaz et al., 2021).

Un contrato inteligente es un programa de computadora escrito en uno de varios lenguajes de programación, incluidos Solidity, C++, Golang, Python y JavaScript, que controla la confianza y asegura la ejecución del contrato. Con el tiempo, se prevé que la adopción de contratos inteligentes aumente, a medida que más empresas integran blockchain y contratos inteligentes en sus operaciones, aunque su desarrollo está en una fase bastante inicial (Korkmaz et al., 2021).

Beneficios de los contratos inteligentes

Los contratos inteligentes están generando grandes ventajas gracias a la tecnología blockchain. Por eso, la llegada de los contratos se remonta a la introducción de la tecnología mejorando las transacciones peer-to-peer, ya que proporcionan una serie de ventajas en términos de velocidad, coste, precisión, y sobre todo, de seguridad. Por eso, los contratos tradicionales se van reemplazando progresivamente por los contratos inteligentes. Procedente de la inmutabilidad de los registros, y gracias a la encriptación que utiliza blockchain, los contratos inteligentes pueden ejecutarse de manera segura y fiable, que son vistos como un potencial sustituto de los intermediarios tradicionales (Korkmaz et al., 2021). Por ello, los contratos inteligentes presentan los siguientes principales beneficios:

- Velocidad y precisión. Al estar desenfocados y automatizados, sistemas de ejecución que evitan procesos lentos y errores intrínsecos a la ejecución manual. Junto a esto, al estar sobre un sistema computacional, tienen menor probabilidad de error/sanción respecto de un contrato redactado y notariado.
- Confianza. Solo se ejecuta transacciones de forma automática dentro de un contenedor cifrado, conforme a las normas preestablecidas y a la que ninguna de las partes tiene poder para cambiar.
- Seguridad. Dificultad al ataque en la medida que ocurre sobre la blockchain. Al estar en la blockchain, los datos no están concentrados en un solo servidor. La información está almacenada en bloques enlazados, y para alterar algún bloque, deberías modificar todos los siguientes, algo muy difícil.
- Ahorro. Al introducir datos sólo una vez y eliminar el step de validar ante un tercero, se ganan varios minutos en tiempo y ahorro de costos administrativos.
- Reducción de tiempos. Al eliminar pasos intermedios, trámites relacionados con la validación y control del contrato por un intermediario que, en sí, sólo hace de mensajero.
- Reducción de costos. El texto del contrato es accesible para las partes firmantes, y el hecho de no poder alterar el contrato una vez ejecutado les otorga confianza en el acuerdo.
- Transparencia. Cada transacción es almacenada y se mantiene en la blockchain, junto con el hash del contrato y su fecha y hora de ejecución, lo que permite asegurar su disponibilidad futura y recuperación.
- Sustentabilidad. Al ser íntegramente digitales, los contratos inteligentes eliminan el uso de papel y se acogen naturalmente a estas políticas. No requieren de un tercero por confianza para ejecutar o cumplir el contrato.
- Autonomía. Al ejecutarse sobre la blockchain, la ejecución no se ve influenciada ni puede ser cambiada por ninguna de las partes.
- Mejor comunicación. Obliga a que se fijen todos los detalles de la transacción antes de la ejecución. Esto, junto a la definición previa de las condiciones en código, minimiza errores y discrepancias.
- Tipos de contratos inteligentes (Korkmaz et al., 2021)

De acuerdo con Korkmaz et al. (2021), los contratos inteligentes pueden clasificarse en dos categorías principales: contratos legales inteligentes y contratos basados en código. Estos últimos, a su vez, se dividen en tres subtipos: Organizaciones Autónomas Descentralizadas (DAO), Aplicaciones Descentralizadas (dApps) y contratos combinados con dispositivos IoT.

1) Organizaciones Autónomas Descentralizadas (DAO). Organizaciones cuya gobernanza está determinada por reglas establecidas en una blockchain en forma de contratos inteligentes que son completamente autónomas, así como también su funcionamiento.

2) Aplicaciones descentralizadas (dApps). Son aplicaciones que tienen la misma funcionalidad que las aplicaciones convencionales; sin embargo, se ejecutan en el ecosistema de un sistema de red P2P como una blockchain, lo que evita que funcionen basándose en un servidor central.

3) Contratos inteligentes + IoT. Abarcan a los contratos inteligentes que interactúan directamente con los dispositivos del Internet de las Cosas, lo que permite la integración de procesos físicos y digitales.

Casos de uso de contratos inteligentes (Korkmaz et al., 2021).

El ámbito de aplicación de los contratos inteligentes se expande continuamente. Hoy en día, pueden encontrarse en sectores tan diversos como la cadena de suministro, administración electrónica, juegos, apuestas, banca, seguros, energía, IoT, industrias creativas, servicios de TI, tecnología legal, movilidad, contabilidad, auditoría e identidad digital (Korkmaz et al., 2021).

Los contratos inteligentes en el ámbito energético han mejorado las plataformas de blockchain como medio para gestionar la coordinación en mercados distribuidos en microrredes. A su vez, al integrar Ethereum en una microgrid, los nodos de generación y consumo podrían negociar previamente acuerdos de compra-venta mediante contratos inteligentes, sin la intervención de un tercero. Así, los contratos Ethereum-sharp, que generalmente son desarrollados en Solidity, serían esenciales para llevar a cabo estas transacciones entre distintos generadores y consumidores de energía. De forma adicional, los contratos en la red Ethereum pueden ser implementados en otros lenguajes de alto nivel, como Serpent (Python), Vyper (Python), LLL (bajo nivel Lisp) y Bamboo, siendo Solidity el lenguaje más comúnmente usado por su intuitividad y soporte de código abierto (Korkmaz et al., 2021).

Ethereum también se basa en un lenguaje de programación Turing-completo, lo que permite a los desarrolladores crear contratos inteligentes más complejos e iterativos. La diferencia principal es que estas aplicaciones no se ejecutan directamente en una computadora, sino que corren en la Ethereum Virtual Machine (EVM) de manera distribuida. Para ello, el código de alto nivel compilado por el compilador se transforma en un archivo binario que contiene el bytecode EVM. No obstante, la unidad básica para representar el código de bajo nivel en la EVM es el opcode. Por lo tanto, la representación en EVM es opcodes (Morris, 2013). Solidity es el lenguaje más utilizado para el desarrollo de contratos inteligentes en Ethereum. Existen dos compiladores que generan el bytecode EVM ejecutable a partir de contratos escritos en Solidity: solc-js, desarrollado en JavaScript, y solc, programado en C++ (Korkmaz et al., 2021). Se muestra una visualización del proceso de compilación a opcodes EVM en la figura 4.21.

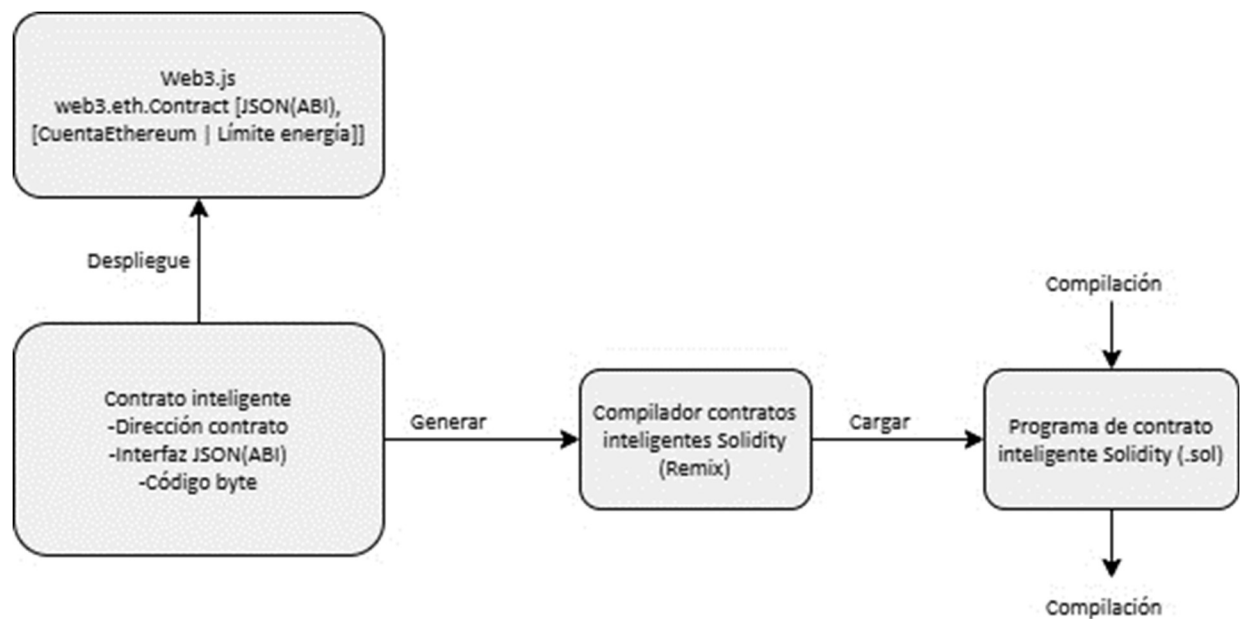


Figura 4.21. Como un se crea el contrato inteligente (Korkmaz et al., 2021).

Construcción de contrato inteligente

Las plataformas blockchain se pueden clasificar en función de su naturaleza pública o autorizada. En las plataformas abiertas como Bitcoin y Ethereum, cualquier persona puede acceder y participar en las transacciones e interactuar con el consenso de la red. Sin embargo, las blockchain autorizadas, como Hyperledger, Quorum o Corda, no permiten el mismo acceso. El acceso a la red y el consenso se producen en virtud de una serie de reglas de autenticación y autorización. La autenticación se refiere a la capacidad de acceder a la red y estar presente en ella, mientras que la autorización determina los permisos que tiene un nodo en la red, por ejemplo, leer, escribir y validar un bloque de transacciones. Una vez que se tiene la autorización, la red puede ser pública, privada o permissionada. Las blockchain autorizadas son de tipo privadas o de consorcio. En las blockchain privadas, la criptografía y el consenso son gestionados por un único nodo validador, mientras que, en las consorciadas, validador o conjunto de validadores son seleccionados de manera predefinida entre un grupo de nodos (Korkmaz et al., 2021).

En el caso de Ethereum público, la cadena permite que cualquier participante realice consultas sobre bloques, lleve a cabo transacciones y las valide. Sin embargo, este modelo presenta problemáticas de escalabilidad, lentitud en la verificación y congestión de la red, lo que hace que no sea óptimo para llevar a cabo intercambios directos entre prosumidores-clientes y verificadores. A pesar de este inconveniente, empresas como PowerLedger han implementado Ethereum público para realizar intercambios abiertos de tokens y contratos inteligentes en mercados energéticos descentralizados (Korkmaz et al., 2021).

Por su parte, en el ámbito de la Ethereum privada, los propios productores de energía (usuarios con dispositivos fotovoltaicos) crean la red blockchain. Aquí, los protocolos pueden ser alterados bajo consenso de los participantes, lo que permite realizar actualizaciones de forma continua. Si bien hay

similitudes, sobre todo en el modelo de minería, en la Ethereum cada nodo colecciona, además de los bloques, un estado global de los contratos y de las cuentas por saldo. Por ello, la criptomoneda Ether circula como un token intercambiable con el dinero fiat, soportada por la billetera digital de los usuarios, de un modo similar a las cuentas bancarias (Korkmaz et al., 2021).

Las tantas variaciones consensuadas crean estas redes privadas que privan a un u otro participante de acceder a los datos, dificultando la trazabilidad al quedar bajo control de entidades ajenas a los contratos inteligentes los datos que los mismos generaron.

La Ethereum Virtual Machine (EVM) es donde se ejecutan los contratos inteligentes. Para ello, se requiere que programas escritos en Solidity, un lenguaje de alto nivel inspirado en JavaScript y destinado a contratos, sean compilados a código de bytes de bajo nivel comprensible por la EVM. Los contratos se ejecutan en la EVM mediante opcodes, que son instrucciones que alternan las tantas operaciones Turing-completas definidas por Ethereum. Los opcodes u operación por nodo se propagan en la red blockchain debido a los nodos de ejecución. En cuanto a la lógica de programación, Solidity define contratos en lugar de archivos, lo que se asemeja a definir clases en la programación de tipo orientada a objetos. A continuación, se definen las variables y las funciones necesarias para desarrollar la lógica del negocio (Korkmaz et al., 2021).

En el ámbito energético, los contratos inteligentes implementados en Ethereum posibilitan el intercambio P2P de electricidad en redes locales de microrredes interconectadas. Estos contratos incluyen tanto aspectos técnicos como comerciales, lo que los convierte en herramientas fundamentales para la automatización y trazabilidad de transacciones energéticas descentralizadas (véase la Figura 4.22) (Korkmaz et al., 2021).

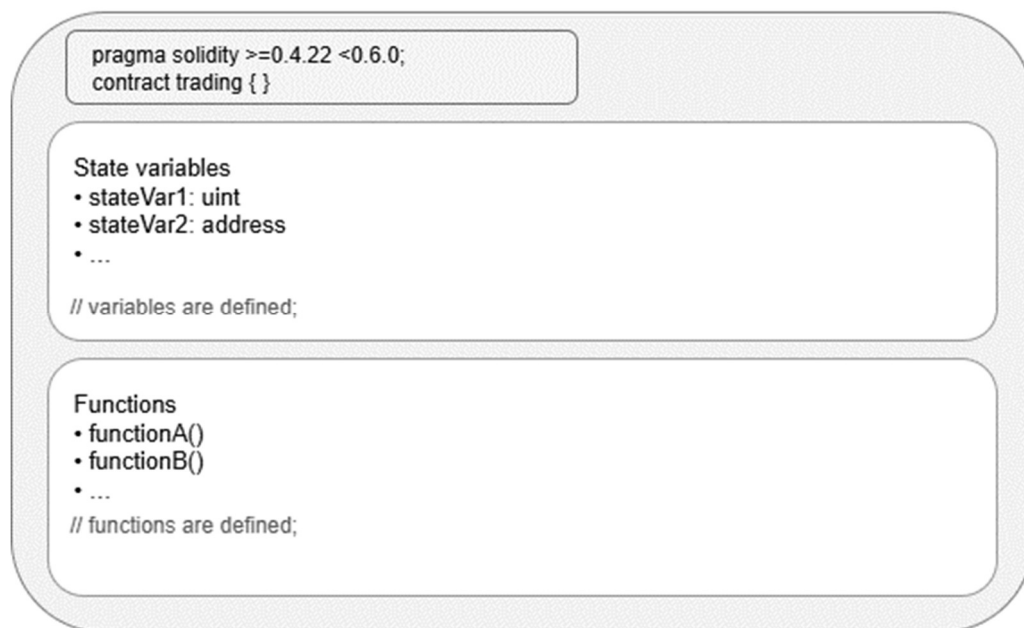


Figura 4.22. Ejemplo de los contratos inteligentes que se producen en Solidity utilizando la predefinida consigna "Contrato" (Korkmaz et al., 2021).

Para desplegar un contrato inteligente en blockchain, es necesario establecer previamente dos parámetros: el límite de gas y el precio del gas. El primero corresponde a la cantidad máxima de gas que el usuario está dispuesto a pagar para ejecutar el contrato, mientras que el segundo determina el valor del gas en relación con la criptomoneda de Ether. Con un precio de gas mayor, los mineros priorizarán ese particular contrato, acelerando así su ejecución. Además, cada instrucción o nómina del contrato conlleva un consumo de gas estipulado, y el costo total de la transacción equivale a la cantidad de nodos multiplicada por el precio de validez. Suponiendo que el contrato ha sido desplegado, este posee una dirección única que permite la identificación del contrato en la red. En sus transacciones, los usuarios incluirán la dirección del contrato, los parámetros necesarios y la función que desean ejecutar en dicho contrato. A partir de ese momento, el contrato está en funcionamiento. La ejecución del contrato consume gas, lo que afecta directamente al saldo del usuario. Además, otras métricas, como la cantidad de gas consumido, quedan registradas en un bloque de la red. Si un contrato no ha consumido suficiente cantidad de gas para ser efectivo, el sistema revertirá los cambios, aunque los datos queden almacenados (Korkmaz et al., 2021).

En caso de que el gas asignado a una transacción resulte insuficiente, la ejecución del contrato se interrumpe y la cadena de bloques retorna a su estado inicial, previo a la ejecución. Aun así, el gas utilizado no es reembolsado, lo que constituye un mecanismo de seguridad contra ataques de denegación de servicio por agotamiento de recursos. En términos generales, un contrato inteligente puede considerarse como un programa inmutable que garantiza la ejecución segura de una lógica predefinida entre partes que no confían entre sí, desempeñando un papel equivalente al de un tercero de confianza (Korkmaz et al., 2021).

El contrato de energía inteligente propuesto especifica dos estructuras principales: SellOrder y BuyOrder.

- SellOrder incluye: la dirección del productor, un precio expresado como entero sin signo de 32 bytes, una cantidad de energía de 64 bytes, y una marca de tiempo de 64 bytes.
- BuyOrder contiene una variable de dirección denominada meterAddress e incorpora los mismos atributos que SellOrder (dirección, precio, energía y marca de tiempo).

Los métodos principales del contrato son sellEnergy y buyEnergy, accesibles para todos los prosumidores (Korkmaz et al., 2021):

- sellEnergy. Verifica primero la dirección del vendedor y valida la cantidad de energía ofrecida. Si la cantidad es inferior a 1 kWh, la transacción se invalida. De lo contrario, los parámetros enviados se agregan a la lista de órdenes de venta (SellOrder).
- buyEnergy. Comprueba que la dirección del proveedor no sea nula y que exista una oferta válida. Si los parámetros cumplen las condiciones, los datos se añaden a la lista de órdenes de compra (BuyOrder). Finalmente, la función verifica que el consumidor haya adquirido energía del productor; de no cumplirse esta condición, revierte todos los cambios efectuados.

Los diagramas de flujo de estas funciones se muestran en la Figura 4.23 (Korkmaz et al., 2021).

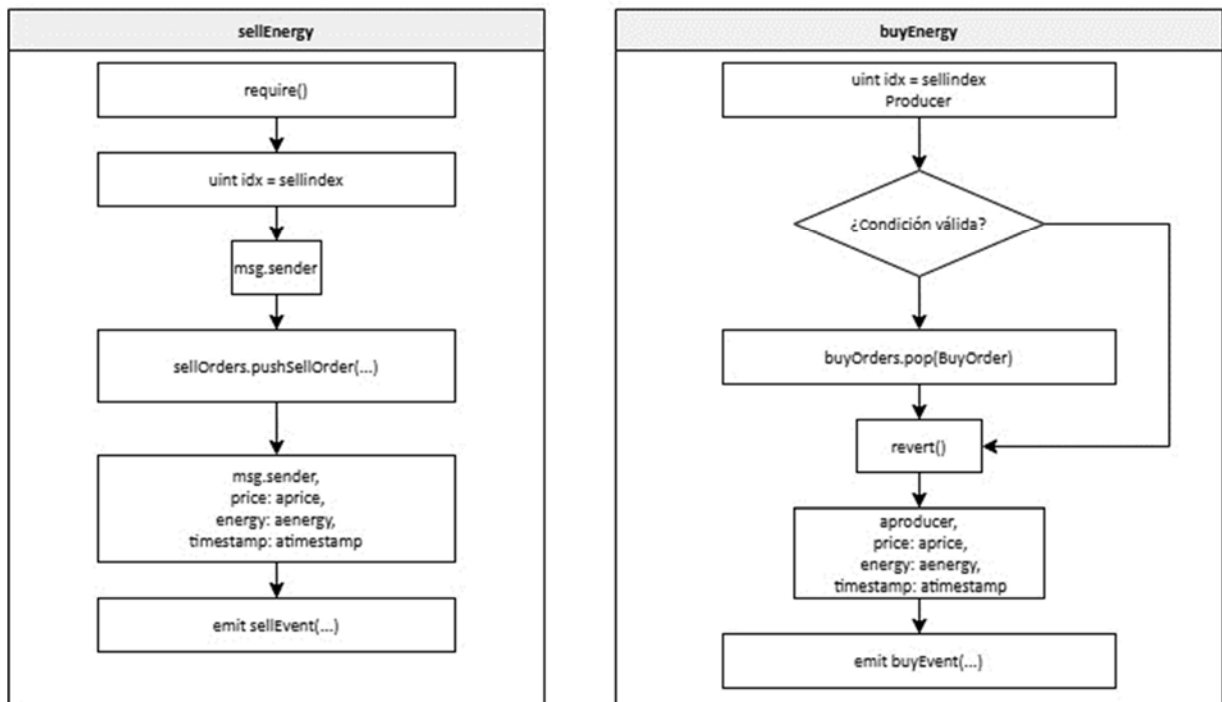


Figura 4.23. Diagramas de flujo de funciones de contratos inteligentes de energía (Korkmaz et al., 2021).

Se hace una propuesta de un modelo de bases de datos para el sistema de gestión de información y procesos para servicio de alumbrado público centrado en la problemática de falta de generando de facturas bajo datos de campo que se integran a través de sistemas de metrología georreferenciada previa integración sobre la capa de datos. La falta de homologación entre lenguajes de programación donde están los sistemas genera un problema técnico que presenta el rediseño del sistema en un sistema de gestión que permite una mejor integración sobre los datos geoespaciales mediante aplicaciones en tecnologías punteras.

Según M. Masso (2019), las principales blockchains como Bitcoin y Ethereum han acumulado una enorme cantidad de datos que deben ser replicados en todos los nodos de la red. Sin embargo, no existe aún una tecnología que reduzca significativamente el espacio en disco requerido, ni un protocolo optimizado que facilite la participación segura y privada de los usuarios.

Objetivos del estudio

En este contexto, se plantean dos objetivos principales:

1. Compresión de blockchain. Examinar esquemas de compresión usando bibliotecas estándar y algoritmos a medida para la estructura y los datos de Bitcoin. Esto permitiría reducir el almacenamiento en disco de la cadena en disco de manera efectiva a lo largo del tiempo, sin perder la confianza en la historia de la cadena.

2. Eficiencia en almacenamiento y privacidad. Determinar el almacenamiento en disco necesario para garantizar una determinada privacidad y seguridad a los usuarios. Los resultados muestran que se puede implementar un protocolo ligero y seguro, que mejoraría la inclusión de dispositivos IoT en la cadena (Masso, 2019).

Bibliotecas modernas de compresión

En cuanto a herramientas prácticas, Masso (2019) argumenta que existen bibliotecas de compresión modernas de uso extendido que poseen versiones implementadas al menos parcialmente en Python, lo que permite su uso sin problemas para pruebas, así como aplicaciones en blockchain. Estas bibliotecas comprenden múltiples parámetros de configuración y que presentan limitaciones específicas de acuerdo con el tipo de datos que se van a comprimir. Mientras tanto, es posible dirigir el enfoque de búsqueda hacia lenguajes diferentes a Python, teniendo en cuenta que casi todos los algoritmos de compresión modernos tienen al menos una implementación que puede generarse como ejecutable bajo Linux.

La compresión de datos se ha convertido en un recurso clave para optimizar el almacenamiento en aplicaciones blockchain, dado que estas redes acumulan grandes volúmenes de información que deben replicarse en todos los nodos. Existen diversas bibliotecas que implementan algoritmos de compresión sin pérdida, cada una con diferentes características y limitaciones. A continuación, se presentan tres de las más relevantes en el ecosistema de Python: LZMA, LZO y LZ4.

1. LZMA

La biblioteca LZMA implementa el algoritmo Lempel-Ziv-Markov chain algorithm, conocido por su elevada tasa de compresión.

- Parámetros configurables:
 - *Nivel de compresión*: valores de 1 a 9, con una opción adicional *extreme*.
 - *Tamaño del diccionario*: entre 4 KB y 1.5 GB.
 - *Match finder*: diferentes métodos para construir el diccionario de datos (MF HC3, MF HC4, MF BT2, MF BT3, MF BT4).
- Capacidad de compresión: hasta 2.5 GB de datos binarios en una sola operación.
- Limitación principal: resulta ineficiente en blockchain, ya que los datos suelen superar cientos de gigabytes, lo que reduce su aplicabilidad práctica en este ámbito.

2. LZO

El algoritmo Lempel-Ziv-Oberhumer (LZO) se caracteriza por estar optimizado para la velocidad de descompresión, lo que lo convierte en una opción útil en sistemas que requieren acceso rápido a la información.

- Parámetro configurable: nivel de compresión (1–9).
- Ventaja: extremadamente rápido en la descompresión, lo que favorece la recuperación de información en entornos donde la latencia es crítica.

- Limitación: menor tasa de compresión en comparación con algoritmos más sofisticados como LZMA.

3. LZ4

LZ4 es una variante del esquema LZ77, orientada a maximizar la velocidad de compresión y descompresión mediante codificación fija orientada a bytes. Genera archivos como una secuencia de fragmentos comprimidos, cuyo tamaño es configurable.

- Parámetros configurables:
 - *Nivel de compresión*: 0–16 (donde 16 busca el mayor grado de compresión).
 - *Tamaño de bloque*: configurable entre 16 KB y 4 MB.
- Ventajas:
 - Alta velocidad de compresión/descompresión.
 - Adecuado para procesamiento en tiempo real y transmisión de datos IoT.
- Aplicación en blockchain: de acuerdo con Chen, Lin y Yu, en su artículo *Algoritmo de compresión de la blockchain de Bitcoin para la sincronización de nodos en blanco*, la implementación de técnicas de compresión basadas en optimización de punteros (sustitución de punteros hash por punteros de índice) puede reducir el tamaño de almacenamiento hasta en un 12,71% en la blockchain de Bitcoin. Este resultado evidencia el potencial de LZ4 y técnicas similares para reducir los requisitos de almacenamiento en blockchains extensas (Masso, 2019).

En consecuencia, los documentos del estado del arte analizados si bien cumplen con su objetivo para el que fueron diseñados, no son válidos para emitir factura en Sistema de SICOM (Sistema Comercial) de CFE, así como de otras instancias de la República Mexicana, pues todos son foráneos y no cuentan con NOM, posiblemente al atender estas áreas de oportunidad faltaría la parte computacional en cuanto a la interacción de subsistemas particulares con propietarios de CFE.

Por lo anterior, se busca mejorar las metodologías y trabajos existentes para abarcar una mayor cantidad de objetivos en tiempos y plazos preestablecidos. Creemos necesario ampliar la frontera de las soluciones y al mismo tiempo profundizar en el análisis de otras áreas en la búsqueda de alternativas que den cumplimiento a los nuevos requerimientos y desafíos planteados por el alumbrado público.

El modelo ofrecido tiene por finalidad la asesoría a entidades con escaso capital y baja capacidad técnica como los consumidores. Además, para sistemas de alumbrado público en el caso, la base de datos de georreferencias, tipos de luminarios y materiales instalados, mejorando el servicio de atención a los mantenimientos preventivos, apoyo a las brigadas que desarrollen la atención en campo mediante itinerarios más óptimos, con el ahorro en el consumo de combustible y en horas hombre, y la disminución del tiempo de intervención por interrupción de alumbrado atribuibles a este.

El problema radica en los sistemas de alumbrado público en los censos de carga levantados por los proveedores o suministradores eléctricos que generalmente se hacen sin el apoyo de tecnología, y se hacen en campo de una forma arcaica e ineficiente técnicamente con pluma y papel. Lo cual genera incertidumbre y no da certeza ni técnica en ninguna parte y esto se refleja de forma negativa en los consumos con base a la tarifa contratada por parte del consumidor en gastos excesivos los cuales son

mensuales y constantes, este es el caso de México por tener un suministrador paraestatal de energía y aplica para los alumbrados que son concesionados.

Actualmente, en la gran mayoría de núcleos urbanos, el mantenimiento del sistema de alumbrado público depende del ente municipal que tiene la responsabilidad de la instalación. Para poder gestionar estos conjuntos de luminarias que en la actualidad suman miles e incluso millones de puntos de luz, se centraliza toda esta información en un sistema de gestión del alumbrado público en los Servicios Municipales. Subcontratando estos servicios a empresas de servicios energéticos o, bien, si la seguridad de pago lo permite, se realiza un contrato de mantenimiento directo a las luminarias con alguna empresa electricista (García Jacobs, 2023).

IPFS (InterPlanetary File System) es una de las tecnologías más maduras para el intercambio y almacenamiento descentralizado de archivos en una red peer-to-peer. Desde su creación y la publicación de la especificación, esta tecnología ha tenido un avance continuo tanto en herramientas para su utilización como en la adopción de proyectos empresariales. Tiene características que la hacen atractiva a nivel de implementación para el caso de estudio, dado que el contenido publicado es accesible a la red, ya que la propagación de enlaces o contenido se refleja en los distintos nodos sin la necesidad de mantener en línea continuamente los equipos que suministran esos datos. Tiene implementaciones de código de compresión que fragmentan un archivo en múltiples bloques, siendo menor el tamaño del archivo final, pero que en sí mismo tiene la misma forma de acceso. Además, tiene sensores para enviar datos de una PLC (Cabrera Rojas & Laura Condori, 2024).

LZ4 es un formato de compresor de archivos muy rápido, enfocado en alta compresión. Utiliza la división del comprimido y las tablas hash del contenido reparado. Tiene optimizaciones específicas, logrando que sea necesario buscar el sentido de las modificaciones. No logra una de las mayores compresiones, pero es ampliamente más rápido que las otras. No mantiene una tasa de transferencia de la red. Puede ser útil donde la compresión y descompresión rápida son prioridad. Una posibilidad de su implementación será utilizada para comprimir los archivos previo envío a la plataforma NoSQL. Blockchain es diferente a lo que existe en el mercado desde la invención de monedas digitales; es una red distribuida sin punto central y con un espacio de almacenamiento infinito de bien común accesible a quien desee, y ninguna institución puede censurar. Posee una arquitectura más eficiente que la de otras plataformas y supera la lentitud del Bitcoin; no es necesario usar mineros, lo que la hace especial.

Según un análisis en cuanto a rendimiento y velocidad (Suhendri & Suryana, 2023) Ethereum es una muy buena alternativa a la implementación de Blockchain. Hasta ahora, han sido evaluados sistemas de transporte distribuido, plataformas de entretenimiento, pero es capaz de manejar e historiar bases de datos distribuidas de sistemas de iluminación de la calle.

4.9.1 Estado de la práctica

Además de los 24 estudios analizados en el estado del arte, se incluyeron cinco documentos adicionales que no cumplen estrictamente con los criterios académicos más rigurosos, pero que resultan de gran valor para comprender la implementación práctica y el contexto aplicado de las tecnologías revisadas. Estos trabajos corresponden principalmente a reportes técnicos, tesis de maestría y artículos de divulgación tecnológica, y su inclusión responde a la necesidad de identificar experiencias cercanas a la aplicación real en campo.

La relevancia de estos documentos radica en que aportan:

- a) Casos aplicados de alumbrado público inteligente y sistemas AMI, en los que se describen prototipos piloto, pruebas de laboratorio o implementaciones a pequeña escala realizadas por instituciones públicas o privadas.
- b) Reportes técnicos de organismos energéticos, que detallan la viabilidad de usar blockchain en la gestión de infraestructura eléctrica, así como posibles escenarios regulatorios y económicos.
- c) Estudios preliminares de compresión y almacenamiento distribuido, con propuestas orientadas a mejorar la eficiencia del manejo de datos, aunque sin pruebas exhaustivas en entornos de gran escala.
- d) Experiencias documentadas en literatura gris (tesis y reportes), que complementan los estudios más consolidados al mostrar enfoques experimentales, aunque en muchos casos con limitaciones metodológicas o de validación empírica.

El análisis que se lleva a cabo en esta revisión de la práctica contrasta los trabajos encontrados en la literatura científica con documentos que presentan experiencias preliminares en su implementación, y ofrece perspectivas que pueden resultar más completas sobre los retos y oportunidades de la adopción del modelo AMI–LZ4–IPFS–Blockchain. Entre los aspectos que se recogen en estos materiales no científicos, se resalta la relevancia de discutir sobre la interoperabilidad con infraestructuras tradicionales, la escalabilidad en contexto urbanos, y los costos de implementación; estos puntos suelen quedar marginados en artículos de investigación.

- Brooklyn Microgrid

Proyecto pionero en Nueva York que permite a los prosumidores intercambiar electricidad de forma directa mediante contratos inteligentes sobre blockchain. El sistema elimina intermediarios, asegura la integridad de los datos de medición y automatiza la liquidación de transacciones energéticas. Su arquitectura es relevante para el modelo propuesto de gestión descentralizada de datos en infraestructura pública, ya que combina registro inmutable, medición avanzada y gobernanza distribuida, principios clave para un alumbrado público telemedido seguro y eficiente (Korkmaz et al., 2021).

- Centrica Pilot

Plataforma experimental implementada en Cornualles (Reino Unido) en la infraestructura existente mediante contratos inteligentes, con participación de entidades locales y MEI para crear incentivos de reducción de carga. Demuestra cómo la flexibilidad y los contratos inteligentes se pueden incorporar en sistemas distribuidos, aplicados a la gestión flexible del consumo energético (Korkmaz et al., 2021).

- LO3 Energy

Desarrolladora de la plataforma Exergy, basada en subastas P2P para el intercambio de energía local. LO3 ha replicado con éxito modelos como Brooklyn Microgrid en diversas regiones, optimizando la asignación de recursos energéticos y garantizando la transparencia de las transacciones. La lógica de subastas y verificación descentralizada aporta una referencia clara para la implementación de

mecanismos de distribución y control en redes de alumbrado público teledirigido (Korkmaz et al., 2021).

- Power Ledger

Un ejemplo que aplica los conceptos anteriores es el startup australiano Power Ledger. Esta plataforma permite la compra-venta en tiempo real de sobrantes entre usuarios en sistemas de generación distribuida. Emplea tecnología blockchain para asegurar la trazabilidad y la integridad de la información compartida. El hecho de que la plataforma sea interoperable con distintos actores como usuarios residenciales, empresas de servicios energéticos y el gobierno, ilustra la escalabilidad de estas soluciones. En línea con esto, Power Ledger es presentada en este trabajo como una alternativa para interconectar los diferentes nodos de alumbrado y las instituciones habilitadas en una red de energía distribuida, de acuerdo con lo propuesto por Korkmaz et al. (2021).

- Lumenaza

Plataforma “utility-in-a-box” que proporciona las herramientas necesarias para operar mercados P2P de energía, integrando funcionalidades de medición, facturación y balanceo. Su arquitectura de manejo de datos y transacciones a nivel local y nacional se utiliza como benchmark para la gestión descentralizada de datos del sistema de alumbrado público, mediante la representación de los flujos energéticos y la layer/pseudolayer de recursos disponibles. (Korkmaz et al, 2021).

- SOLshare

Proyecto innovador en el que se integra mini redes solares distribuidas en pequeños camaradas rurales, de forma que los usuarios que tengan recursos energéticos excedentes puedan vender dichos recursos a los vecinos que no dispongan de acceso a la red eléctrica. Se realiza un registro de las transacciones mediante bloques como forma de asegurar la trazabilidad de las transacciones, así como la transparencia en su gestión. Este modelo es un buen ejemplo de que incluso con un contexto institucional mejorable y poco recurso económico como es el caso presentado, la gestión descentralizada genera suficientes estímulos como para su adopción y éxito. Un modelo de este estilo puede ser extrapolado a la promoción de la gestión distribuida de la infraestructura pública de alumbrado, en escenarios como la ciudad, donde existe un acceso garantizado a las herramientas tecnológicas necesarias para el funcionamiento del modelo como es la red de telecomunicaciones, a un coste más que asumible con el ahorro en costes en la gestión. Un modelo de este estilo puede ser extrapolado a la promoción de la gestión distribuida de la infraestructura pública de alumbrado, en escenarios como la ciudad, donde existe un acceso garantizado a las herramientas tecnológicas necesarias para el funcionamiento del modelo como es la red de telecomunicaciones, a un coste más que asumible con el ahorro en costes en la gestión. Korkmaz et al. 2021

- Modelo D3A (Decentralized Autonomous Area Agent)

Se presenta una infraestructura de mercado transactivo, descentralizado y autónomo desarrollada por la Energy Web Foundation, en la que los agentes gestionan recursos energéticos distribuidos bajo principios de descentralización, recursividad y transparencia privada. Cada uno de los tres principios tiene una aplicación específica: la descentralización espera un vínculo económico directo entre

comprador y vendedor, la recursividad define mejor la rentabilidad de competir como empresa, mientras que la transparencia privada evita que se filtre información entre competidores. Sin embargo, este diseño tiene como principal limitación la falta de aplicaciones concretas en la promoción de la utilización de la Energía Distribuida a través de Recursos Energéticos de Proximidad en Servicios Públicos. Este artículo extendió el diseño e implementación de la propuesta consensuada por la Energy Web Foundation, adaptando a un contexto más masivo y con capacidad de gestión telemedida y telecontrol, de alumbrado público. Lo cual contribuye a un sistema más sostenible, más resiliente y más seguro (Bronski et al., 2018).

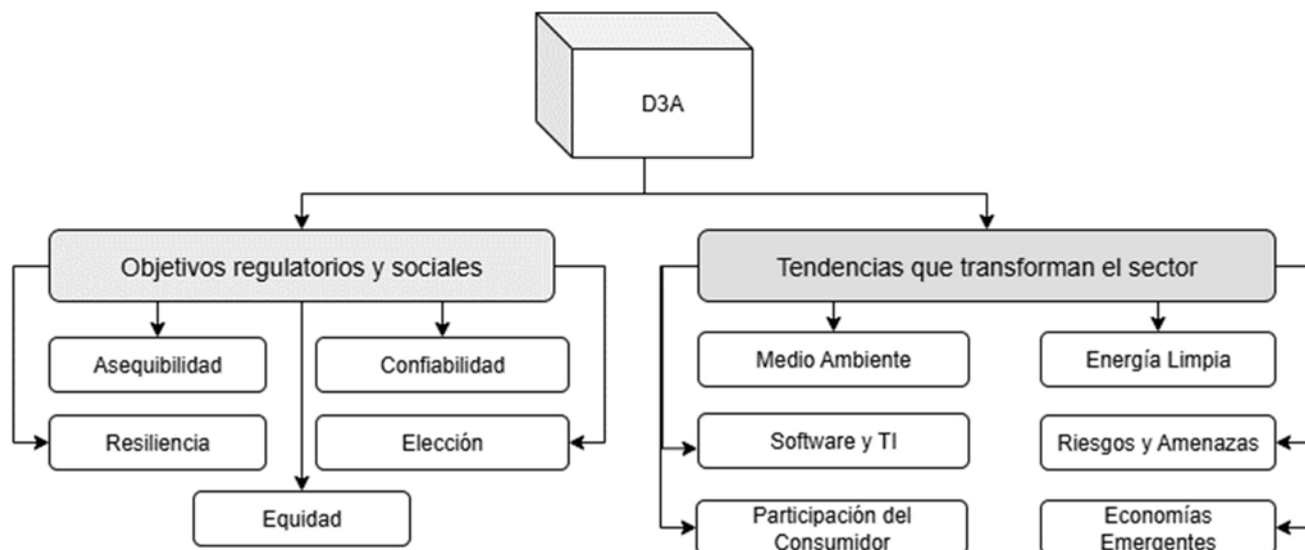


Figura 4.24. Modelo D3A, elaboración propia basada en (Bronski, P. et al 2018).

Nº	Categoría	Referencia / Autores	Año	Fuente / Tipo	Aportación principal
25	Estado de la práctica	CFE – SICOM (Sistema Comercial)	2022	Documento / Operación	Requisitos de facturación y gestión comercial aplicables al AP en México.
26	Estado de la práctica	CEN/EN 15232 (eficiencia BAC en edificios)	2012+	Norma europea	Guía de clases de eficiencia aplicable al control de iluminación exterior.
27	Estado de la práctica	CEN TC 169/226 JWG – Metodología de evaluación AP	2012	Grupo de trabajo	Metodología para medir y verificar consumo en secciones de alumbrado.

28	Estado de la práctica	IBM. <i>Enterprise Blockchain Security & Best Practices</i>	2025	White paper	Marcos de ciberseguridad y garantías para apps blockchain empresariales.
29	Estado de la práctica	Gavin Wood. <i>Ethereum Yellow Paper</i>	2014	Especificación	Semántica formal de EVM: base para contratos y costos de gas.

Tabla 4.4. Tabla del estado de la práctica.

Capítulo 5: Metodología

Con el fin de analizar y abordar de manera efectiva el complejo problema tecnológico que implica la gestión descentralizada de grandes volúmenes de datos en diversos AMI-IoT de alumbrado público, este documento presenta una propuesta detallada de un protocolo que integra diversas tecnologías innovadoras. Esta investigación, profundamente relacionada con la gestión de datos en la red de alumbrado público que se encuentra teledorado, aborda el tema como un protocolo, el cual cumple con los siguientes objetivos específicos. Tras una exhaustiva revisión realizada sobre los métodos y tecnologías que se han estado utilizando actualmente en diferentes ciudades del mundo, se observó de manera clara que, a pesar de los avances significativos, aún no existe una técnica o tecnología que pueda ser considerada como el método ideal y definitivo para la gestión eficaz de grandes cantidades de datos en un sistema de alumbrado público (Cabrera Rojas & Laura Condori, 2024).

En ausencia de metodologías consolidadas, se pone de manifiesto que resulta prácticamente ineludible la generación acumulativa de grandes volúmenes de información provenientes de sistemas de teledorada de alumbrado público, que, lejos de convertirse en un mero gasto patrimonial, devienen un activo para la mejora de la toma de decisiones y para asegurar la obtención de ahorros escalables mediante la aplicación de técnicas analíticas sobre datalakes. Este tan solo representa el inicio del arduo camino que diversas firmas de ingeniería en el sector de gestión y control de infraestructuras han comenzado a recorrer para encontrar alternativas idóneas en tales escenarios y para acometer paralelamente la investigación y puesta en práctica de nuevas tecnologías que escalen y mejoren la transmisión y el manejo de la información, tal y como ilustran capitaneados por el barniz valioso que ofrece el caso del Internet de las cosas. Al mismo tiempo, incrementar la generación del conocimiento en el campo de los sistemas de teledorada de alumbrado público inteligentes permitirá contribuir a darle respuesta.

5.1 Enfoque metodológico

El desarrollo de este trabajo requirió no solo la formulación conceptual del modelo propuesto, sino también la definición de un proceso estructurado que guiara cada una de sus etapas. La metodología que aquí se expone representa la ruta seguida para transformar una idea en un sistema funcional, capaz de integrar tecnologías emergentes como IPFS, LZ4 y blockchain en el contexto de la gestión descentralizada de datos para el alumbrado público teledorado.

En este capítulo se describen las múltiples fases de la investigación que van desde el diseño al planteamiento inicial y hasta el cierre mediante la validación del modelo. Se detalla en primer lugar el enfoque adoptado para ello, que pretende combinar de forma equilibrada la rigurosidad académica con la viabilidad del modelo para la toma de decisiones. En segundo lugar, se describen en detalle el diseño y la forma en que se materializó la arquitectura del modelo en relación a los desafíos de almacenamiento, transmisión y seguridad que presentan los datos.

El apartado metodológico contempla, además, la fusión hardware-software, etapa crucial que permite trasladar una propuesta que tiene carácter teórico a una solución que pueda ser implementada en un entorno real. Se expone el procedimiento seguido para el análisis de desempeño y validación de cada uno de los sistemas y sub-sistemas desarrollados, de manera de poder asegurar que cada componente contribuía en forma efectiva al cumplimiento de los objetivos establecidos. Por último, se describen las fortalezas y debilidades técnicas que fueron detectadas, sobre la base de un examen crítico realizado en relación a cada una de las etapas de integración y los resultados de los experimentos.

De esta manera, el capítulo no solo expone las decisiones técnicas adoptadas, sino también el razonamiento que las sustentó, mostrando cómo la combinación de herramientas, técnicas y criterios permitió dar forma a una propuesta innovadora y aplicable dentro del campo de la gestión inteligente de infraestructuras energéticas.

En México, pocos municipios emplean medidores eléctricos IoT en las instalaciones de sus sistemas de alumbrado público. Una demanda latente en estos sistemas corresponde a la seguridad, privacidad y confiabilidad en el procesamiento de datos bajo condiciones no estáticas. En este contexto, la cadena de bloques, el sistema de almacenamiento distribuido Inter Planetary File System y LZ4 se investigan como métodos de gestión y distribución eficiente y confiable del flujo de datos.

InterPlanetary File System (IPFS) es un protocolo y una red descentralizada de pares de iguales que gestiona todo tipo de datos. En IPFS, los datos son eficientemente empaquetados y, una vez subidos a la red, se identifican mediante un hash, lo que garantiza la confiabilidad de la información. A través de IPFS, es posible hacer que un conjunto de datos disponga de varios punteros a un mismo hash, en un concepto similar al mecanismo denominado enlace duro de los sistemas de archivos convencionales. IPFS es actualmente el protocolo de red que se postula como reemplazo de HTTP/HTTPS y sobre el que se están desarrollando diferentes puertas de enlace de compatibilidad, además, su desarrollo puede utilizarse para la transmisión y almacenamiento seguro de grandes volúmenes de datos (Galván Torres, 2021).

LZ4 es un algoritmo de compresión sin pérdida, de flujo y bloque, muy rápido y considerado el más veloz del planeta hoy en día, mejorando en velocidad de compresión alrededor de tres veces un algoritmo genérico, por lo que es ideal para múltiples plataformas. Además, al ser open source, su uso es bastante común. En Blockchain, este algoritmo suele usarse en los bloques que contienen la información almacenada en cadena. Dicha función, al ser aplicada en los nodos servidores, permite un utilitario mucho más rápido disminuyendo el ancho de banda y los tiempos de procesamiento en comparación con otros métodos de compresión.

Blockchain, por su parte, es una tecnología de almacenamiento y gestión de datos en la que la información se organiza en bloques secuenciales. Gracias a la lógica subyacente del algoritmo, esta estructura impide la manipulación maliciosa de los datos. Cada bloque contiene un hash único, y cualquier intento de modificar los datos en un bloque requeriría recalcular el hash de ese bloque y de todos los bloques anteriores. Este proceso representaría un alto costo computacional para los atacantes, especialmente a medida que la cadena crece (Charne, 2021).

De este modo, LZ4 y Blockchain se complementan para optimizar el manejo y la seguridad de los datos en sistemas distribuidos. El modelo propuesto en este trabajo de tesis tiene como objetivo mejorar el alumbrado público bajo las tarifas APBT y APMT [CFE,2025] utilizando tecnologías AMI e IoT. Estas tarifas (ver Tabla 6), se reformaron en México en 2014 y se dividieron en suministro y distribución básica en 2016 (Secretaría de Energía 2016) (Rousseau 2024).

El modelo tradicional de AMI/IoT al que comúnmente se hace referencia generalmente implica un entorno residencial o comercial, donde cada medidor proporciona un servicio de valor a un solo cliente. En el contexto mexicano, los usuarios finales de los servicios subrogados enfrentan una situación opuesta al contar con una sola cuenta cameral que agrega miles de equipos. Este artículo presenta un

estudio de caso que pone de manifiesto la necesidad de soluciones AMI/IoT escalables, interoperables y seguras para abordar las complejidades del alumbrado público en una gran ciudad.

CATEGORÍA	Descripción	Tarifa previa	Modelo Comercial
Doméstico	Doméstico bajo voltaje	1, 1ª-F	1 Cliente – 1 Medidor
PDBT	Pequeña demanda, bajo voltaje	2, 6	1 Cliente – 1 Medidor
GDBT	Grande demanda, bajo voltaje	3, 6	1 Cliente – 1 Medidor
RABT	Riego agrícola, bajo voltaje	9	1 Cliente – 1 Medidor
APBT	Alumbrado público, bajo voltaje	5	1 Cliente – Cientos de medidores/dispositivos IoT/AMI
APMT	Alumbrado público, media tensión	5A	1 Cliente – Cientos de medidores/dispositivos IoT/AMI
GDMTH	Gran demanda horaria, media tensión	HM, HMC, 6	1 Cliente – 1 Medidor
GDMTO	Gran demanda horaria, media tensión	OM, 6	1 Cliente – 1 Medidor
RAMT	Riego agrícola, media tensión	9M	1 Cliente – 1 Medidor
DIST	Industrial Subtransmisión	HS, HSL	1 Cliente – 1 Medidor
DIT	Transmisión Industrial	HT, HTL	1 Cliente – 1 Medidor

Tabla 5.1 Clasificación de las tarifas de electricidad en México por cliente, demanda de energía y modelo de medidor AMI/IoT asociado.

5.2 Diseño del modelo

El objetivo principal de esta propuesta radica en la combinación de las tecnologías Blockchain, IPFS y LZ4 para asegurar y optimizar la integración de datos de IoT en las redes eléctricas de servicios públicos, específicamente enfocándose en entornos de alumbrado público. A diferencia de los modelos de referencia, los casos de prueba y las soluciones basadas en plataformas comerciales, estas últimas están restringidas en su aplicación principalmente a usuarios domésticos e industriales. Por el contrario, esta propuesta se centra en las respectivas cajas de medidores IoT de cliente a cliente público, que comprenden el conjunto de medidores a un cliente individual de tipo público, como el alumbrado público. Se muestra que el modelo propuesto supera las soluciones convencionales en términos de eficiencia y seguridad computacional, reduciendo costos/poder de gestión del sistema energético y garantizando la integración eficiente de datos, así como la integración de datos en condiciones adversas y entornos cambiantes con IoT/AMI.

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un método para el acceso, transmisión y recepción de los datos generados por sistemas de tele gestión de consumo de energía eléctrica, específicamente aplicados a suministros de alumbrado público en vía pública, con perspectivas de escalamiento hacia otras subtemáticas de alumbrado público de la misma ciudad, tales como parques, modulaciones en vialidades secundarias, etc. Se fundamentan teóricamente los conceptos de eficiencia, descentralización y sistemas de archivos, con el fin de proponer alternativas que contribuyan a la eficiencia y transparencia del seguimiento al consumo eléctrico, generando la información necesaria y suficiente que permita definir el alcance, sustentar los procesos, conceptos y resultados.

La propuesta de un sistema informático que permita centralizar y cruzar datos sobre el gasto en las luminarias y consumo de energía eléctrica, automatizar procesos, y validar, conciliar, calcular y exportar

cifras para las distintas áreas involucradas al interior de la empresa. Sin contar con Plantilla y Nombre de colaboradores, ya que son datos personales.

Funcionamiento Detallado del Sistema AMI-LZ4-IPFS-BLOCKCHAIN

El sistema propuesto integra tecnologías de medición avanzada (AMI), compresión eficiente (LZ4), almacenamiento descentralizado (IPFS) y trazabilidad a través de blockchain. El objetivo principal es garantizar la integridad, disponibilidad y transparencia de las lecturas de consumo eléctrico. A continuación, en la figura 5.1, se describen los pasos del funcionamiento, divididos por módulos.

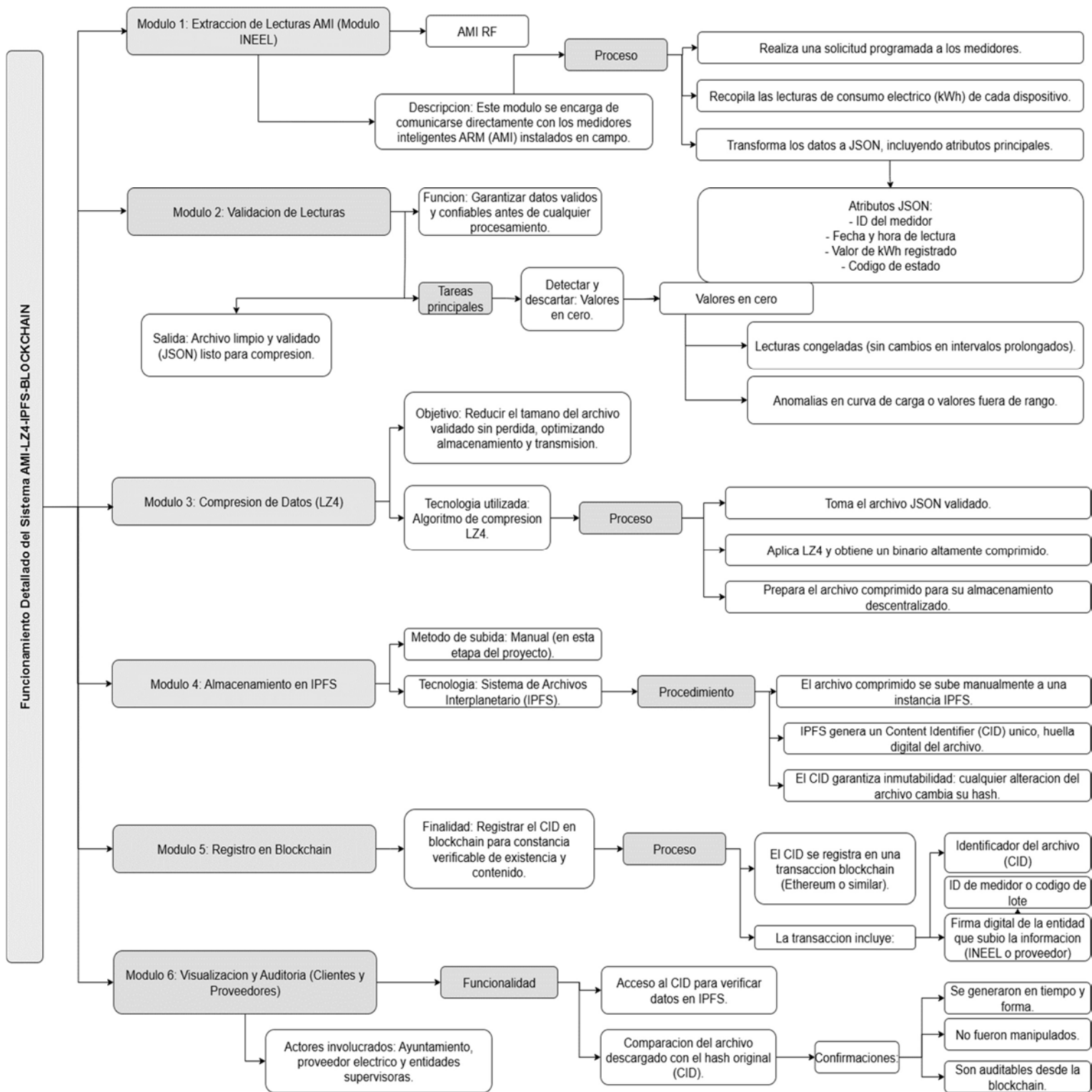


Figura 5.1 Diagrama general del Modelo, elaboración propia.

5.2.1 Arquitectura y desarrollo del modelo

Módulo 1: Extracción de Lecturas AMI (Módulo INEEL)

- Responsable: AMI RF (comunicación por radiofrecuencia)
- Descripción: Este módulo se encarga de comunicarse directamente con los medidores inteligentes ARM (AMI) instalados en campo.
- Proceso:
 - Realiza una tarea de toma de lectura por ciclo 80 CFE.
 - Recopila las lecturas de consumo eléctrico (kWh) de cada dispositivo.
 - Transforma los datos en un archivo con formato JSON, incluyendo atributos como:
 - ID del medidor
 - Fecha y hora de lectura
 - Valor de kWh registrado
 - Código de estado

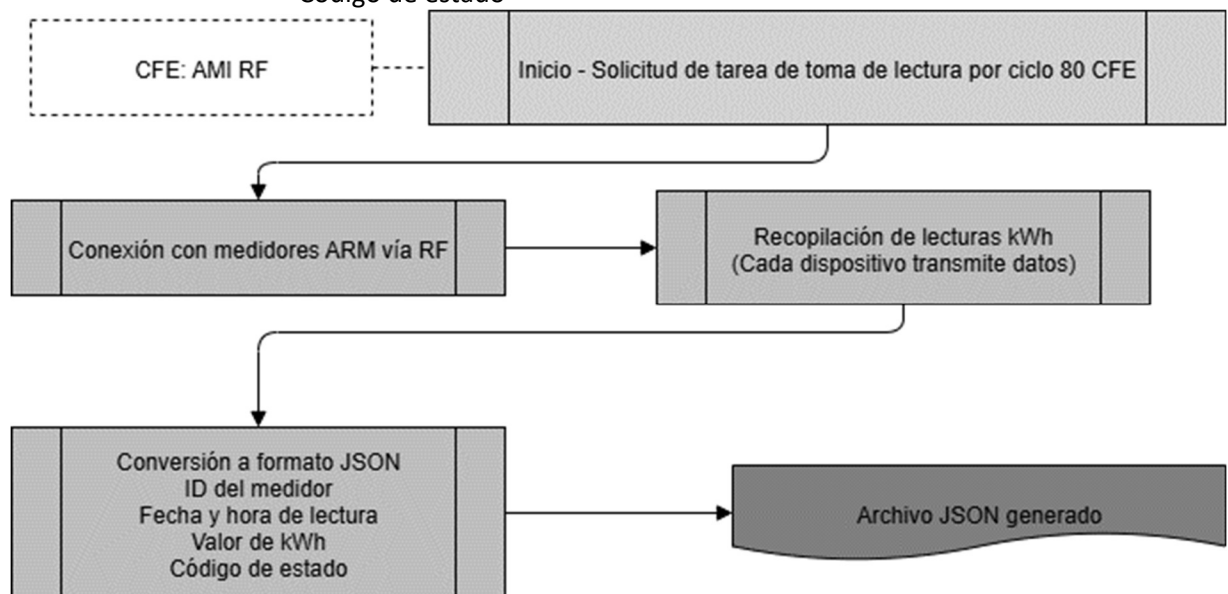


Figura 5.2. Diagrama Módulo 1, elaboración propia

Módulo 2: Validación de Lecturas

- Función: Garantizar que los datos sean válidos y confiables antes de cualquier procesamiento posterior.
- Tareas principales:
- Genera un archivo limpio y validado en formato JSON listo para compresión.
 - Detectar y descartar lecturas con:
 - Valores en cero.
 - Lecturas congeladas (sin cambios durante intervalos prolongados).
 - Anomalías en la curva de carga o valores fuera de rango.

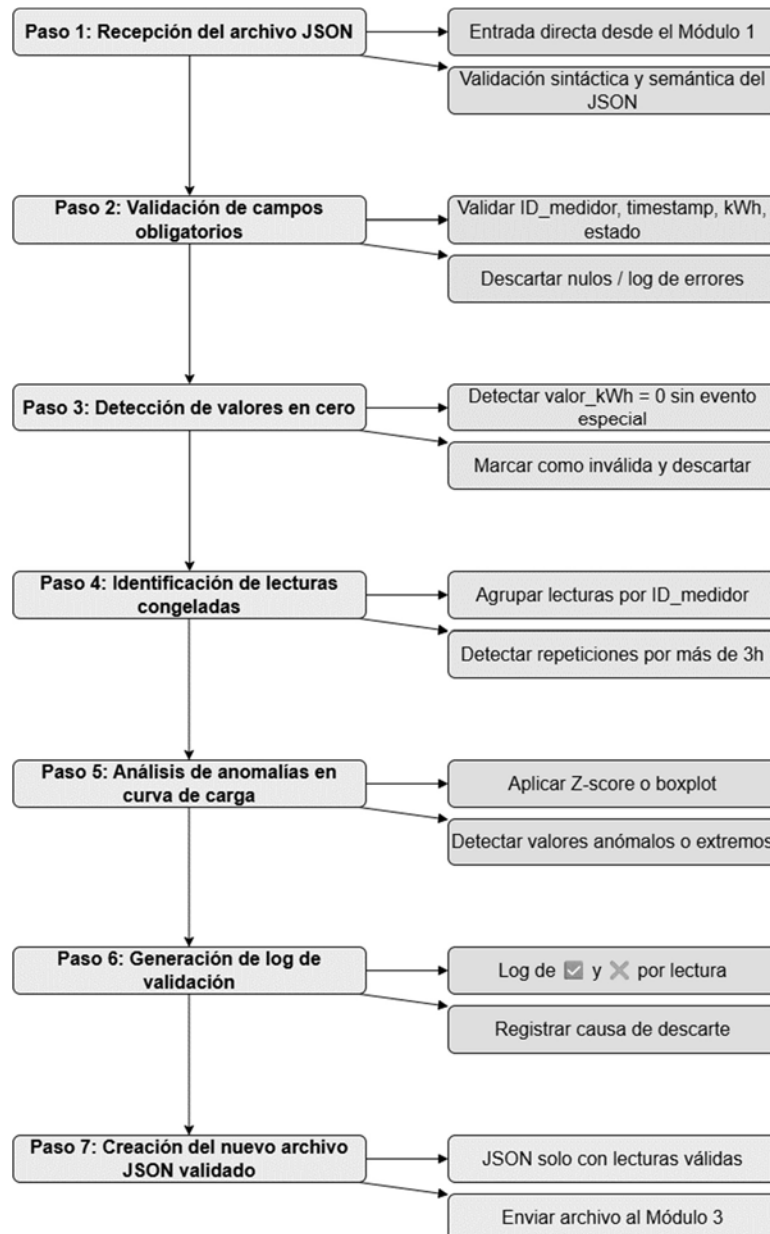


Figura 5.3. Diagrama Módulo 2, elaboración propia

Módulo 3: Compresión de Datos (LZ4)

- Objetivo: Reducir el tamaño del archivo de lecturas validadas sin pérdida de información, optimizando su almacenamiento y transmisión.
- Tecnología utilizada: Algoritmo de compresión LZ4.
- Proceso:
 - Toma el archivo JSON validado.
 - Aplica el algoritmo LZ4, obteniendo un archivo binario altamente comprimido.
 - Prepara el archivo comprimido para su almacenamiento descentralizado.

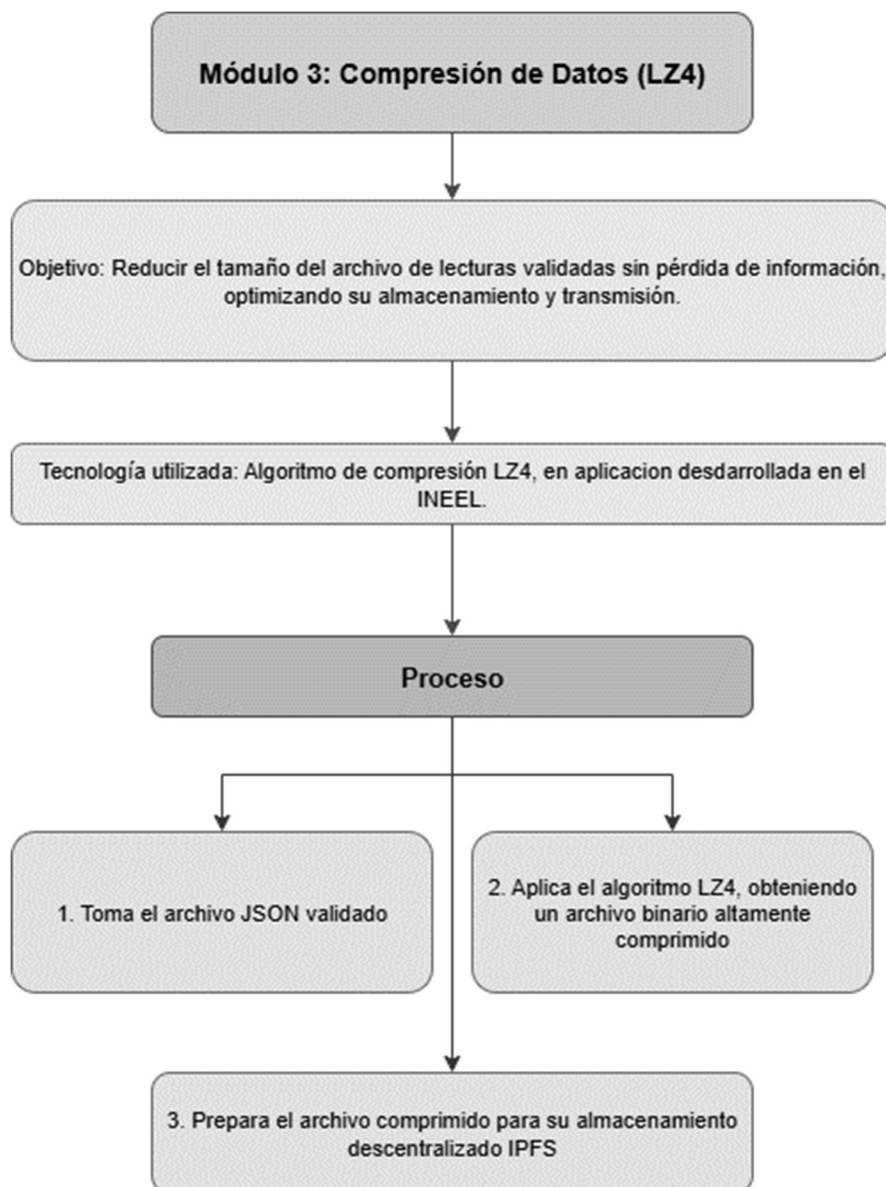


Figura 5.4. Diagrama Módulo 3, elaboración propia.

Módulo 4: Almacenamiento en IPFS

- Método de subida: Manual (en esta etapa del proyecto).
- Tecnología: Sistema de Archivos Interplanetario (IPFS).
- Procedimiento:
 - El archivo comprimido se sube manualmente a una instancia IPFS.
 - IPFS genera un Content Identifier (CID) único, que representa la huella digital del archivo.
 - El CID garantiza que cualquier alteración del archivo modificaría su hash, asegurando inmutabilidad.

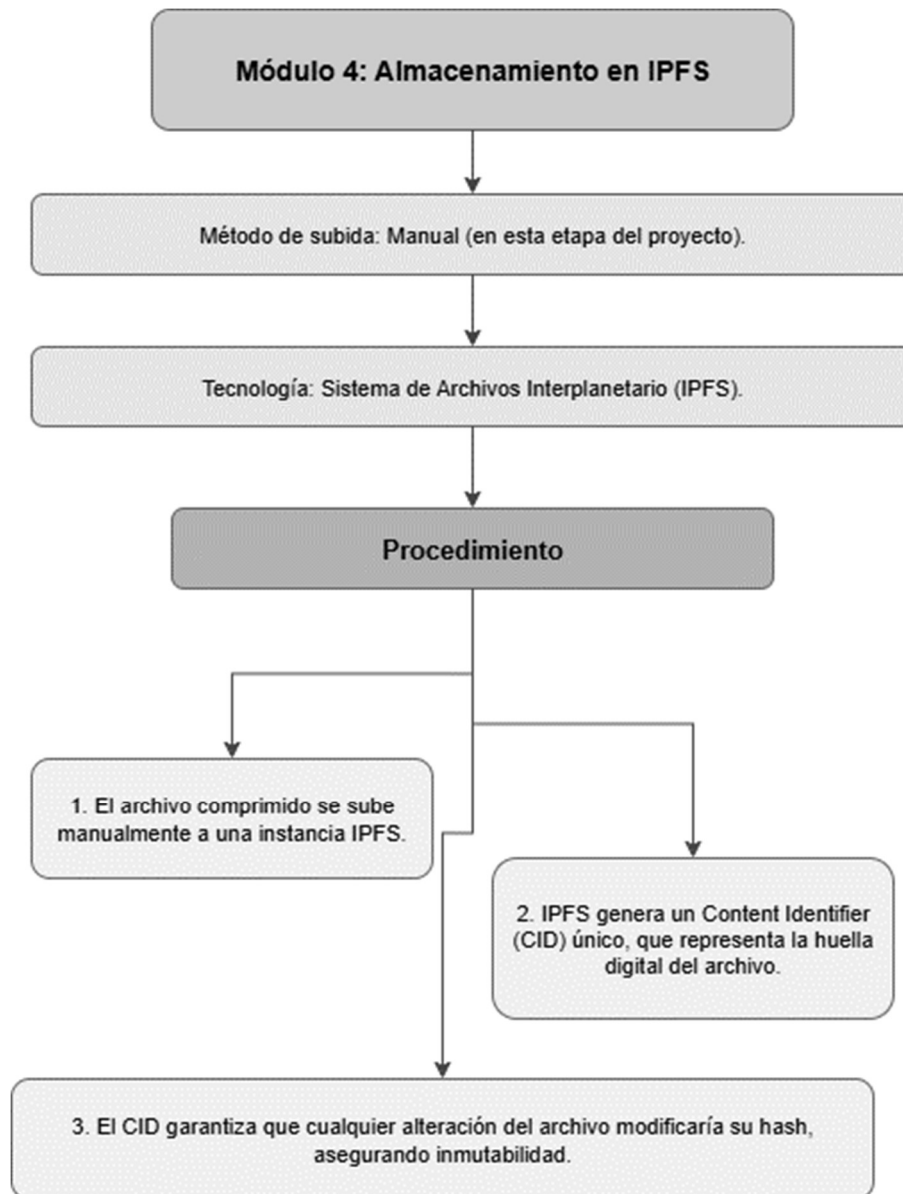


Figura 5.5. Diagrama Módulo 4, elaboración propia.

Módulo 5: Registro en Blockchain

- Finalidad: Registrar el CID en una blockchain para dejar constancia verificable de la existencia y contenido del archivo en un momento determinado.
- Proceso:
 - El CID se registra en una transacción blockchain (Ethereum o similar).
 - Esta transacción contiene:
 - Timestamp (marca de tiempo).
 - Identificador del archivo (CID).
 - ID de medidor o código de lote.
 - Firma digital de la entidad que subió la información (INEEL o proveedor).

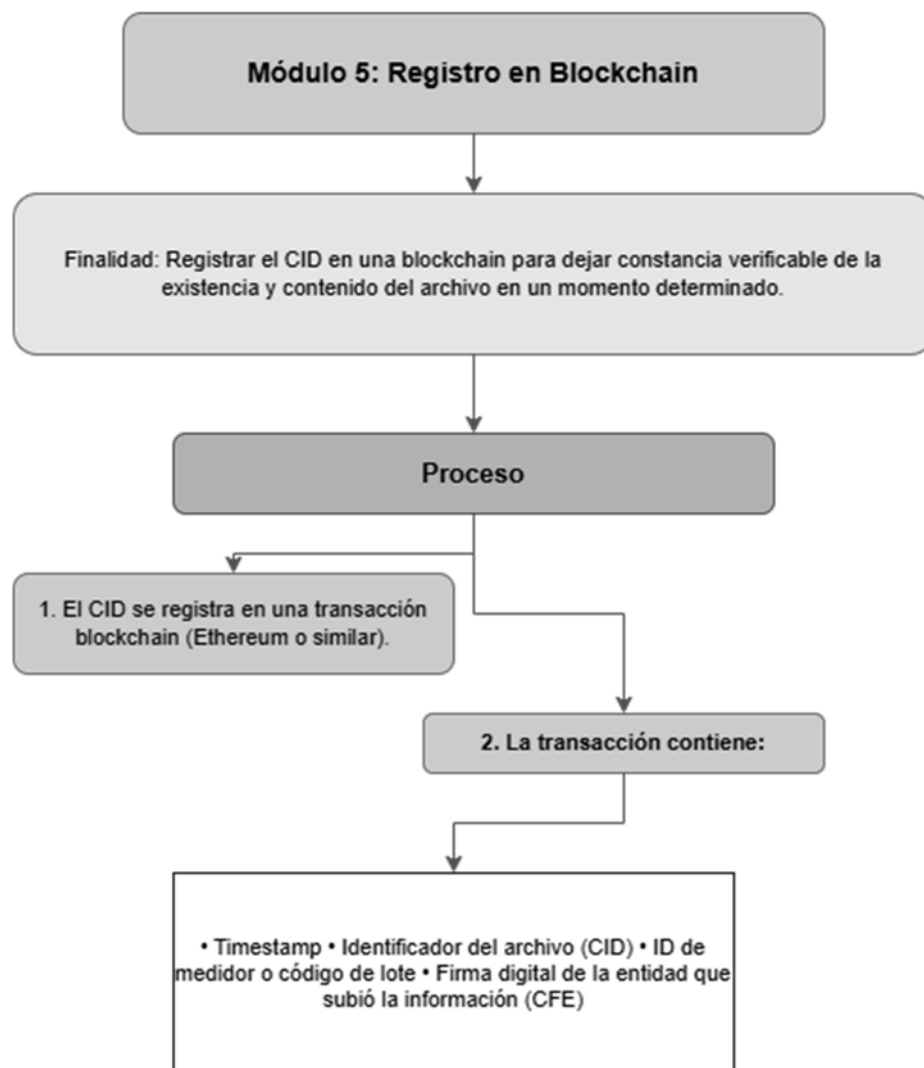


Figura 5.6. Diagrama Módulo 5, elaboración propia.

Módulo 6: Visualización y Auditoría (Clientes y Proveedores)

- Actores involucrados: Ayuntamiento, proveedor eléctrico y entidades supervisoras.
- Funcionalidad:
 - Pueden acceder al CID registrado y verificar los datos en IPFS.
 - Comparan el archivo descargado con el hash original.
 - Confirman que los datos:
 - Se generaron en tiempo y forma.
 - No fueron manipulados.
 - Son auditables desde la blockchain.

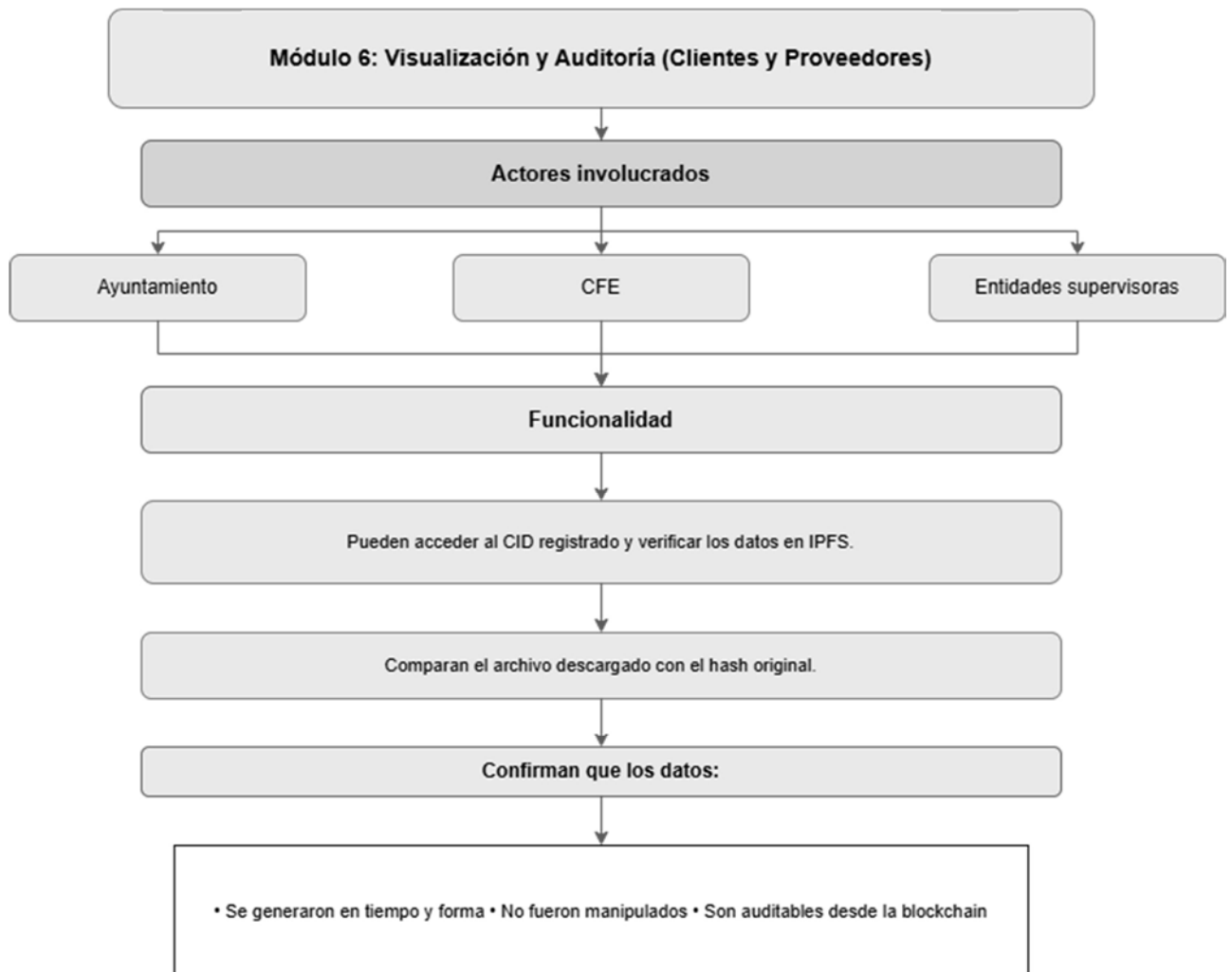


Figura 5.7. Diagrama Módulo 6, elaboración propia.

5.3 Integración hardware-software

Este modelo integra tres tecnologías clave: la compresión de datos mediante el algoritmo LZ4, el almacenamiento y distribución descentralizada con IPFS (InterPlanetary File System) y la trazabilidad y verificación mediante Blockchain. Al combinar estas tecnologías, el modelo mejora significativamente la fiabilidad y seguridad de la transmisión y almacenamiento de datos, a la vez que optimiza los recursos y costos.

El sistema está organizado en cuatro capas principales que interaccionan para cumplir con los objetivos mencionados:

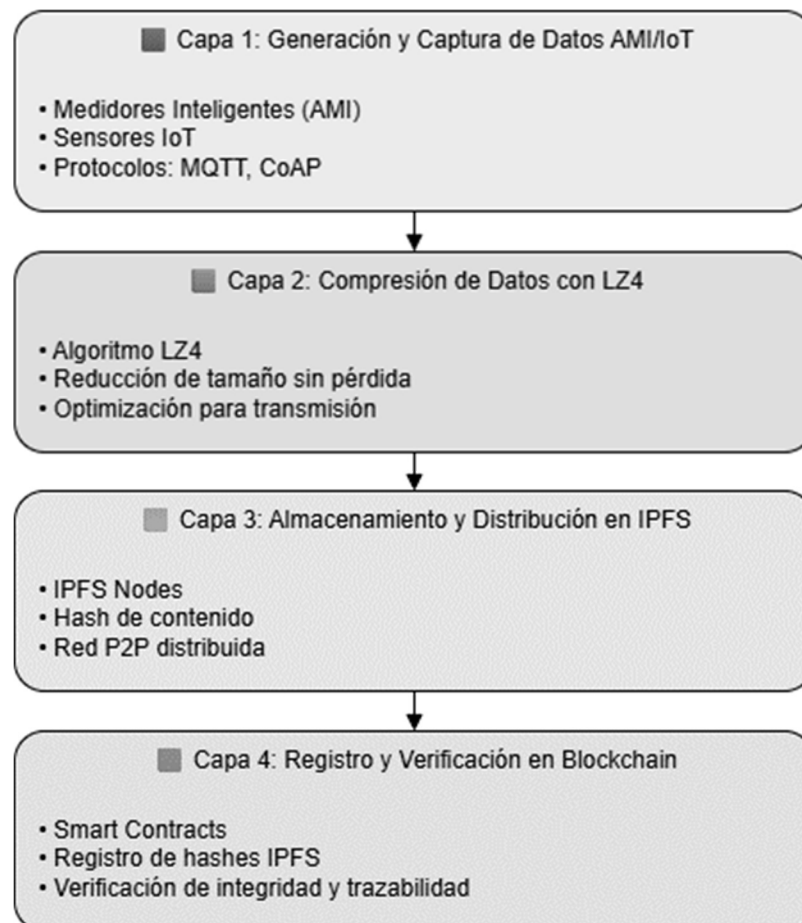


Figura 5.8. Diagrama de Integración hardware-software.

Capa 1: Generación y Captura de Datos AMI/IoT

En esta capa se recogen los datos generados por los dispositivos de medición inteligentes (medidores AMI/IoT), que monitorean el consumo eléctrico en tiempo real. Los medidores utilizados en este proyecto son propiedad del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) y cuentan con una arquitectura ARM y comunicación por radiofrecuencia (RF), lo que permite la recolección remota y en tiempo real de los datos. Como se muestra en la Figura 5.9.

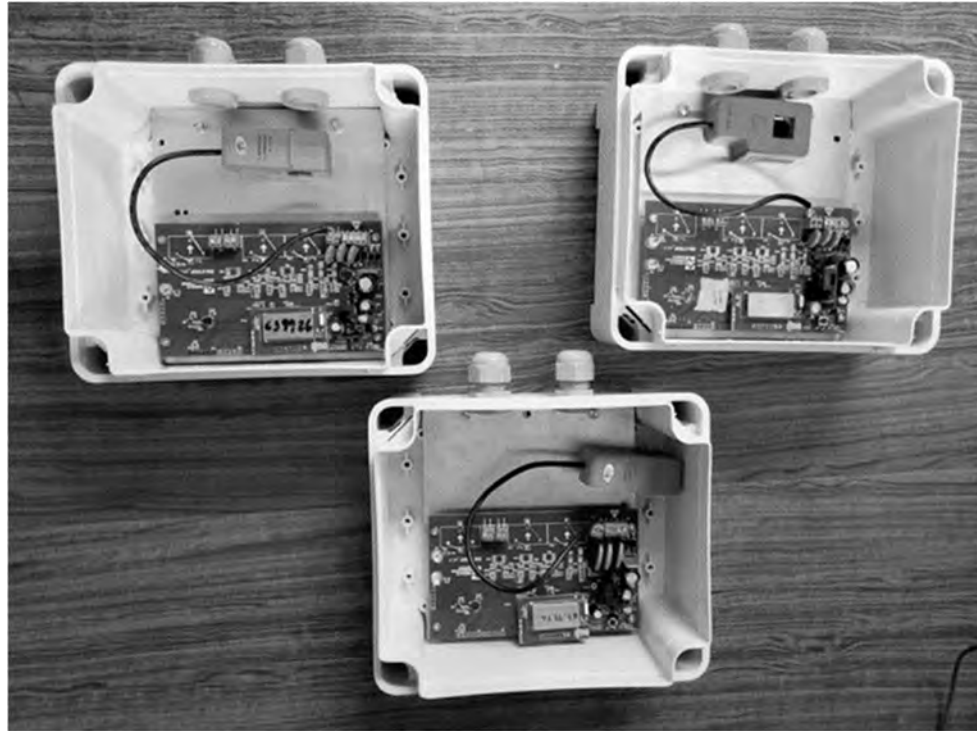


Figura 5.9. Medidores AMI/ARM propiedad del INEEL.

- Formato de datos: los medidores entregan archivos con extensión .json, que corresponde a un formato de archivo JSON, un formato de archivo de texto plano muy utilizado, conocido por ser fácilmente configurable. Sin embargo, el sistema también puede configurarse usando archivos con extensión .xml o .txt para que funcione con archivo en formato XML o texto plano.
- Estructura de los datos: Cada archivo contiene información clave como el ID único del medidor, la fecha y hora de la lectura, y el tipo de dato (por ejemplo, consumo en kWh).
- Simulación de escenarios a gran escala: Con el objetivo de validar la escalabilidad del modelo propuesto, se realizaron simulaciones utilizando conjuntos sintéticos de datos, los cuales representaban escenarios de operaciones en sistemas de alumbrado público con una amplia cantidad de medidores. Se generaron conjuntos de datos que simulaban entre 1 millón, 500,000, 250,000 y 125,000 medidores, cada uno con registros detallados sobre el consumo eléctrico bajo condiciones específicas de baja tensión. Las simulaciones incluyeron situaciones tales como consumos de 0 kWh, errores de medición, medidores incommunicados, disparos de

consumo y caídas de lecturas, especialmente en lámparas dañadas. Estos escenarios permitieron evaluar la capacidad del modelo para manejar irregularidades en los datos y su desempeño en condiciones de anomalías comunes en los sistemas de alumbrado público. De esta forma, se analizó la eficiencia del modelo en el procesamiento de grandes volúmenes de datos y su resiliencia ante fallos o inconsistencias en la información registrada.

Estos 3 medidores generan sus archivos utilizando el formato JSON, con la estructura representada en la Figura 5.10.

```
{  "Id": "7538PH",    "Consumo": 37354,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0000CU",    "Consumo": 45096,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0000NC",    "Consumo": 70776,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "00010C",    "Consumo": 58442,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "00010G",    "Consumo": 93780,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "00010J",    "Consumo": 85023,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "00010Q",    "Consumo": 83475,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "00010T",    "Consumo": 71758,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "00010X",    "Consumo": 10805,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001AL",    "Consumo": 56274,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001BD",    "Consumo": 27011,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001CH",    "Consumo": 33659,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001CI",    "Consumo": 52655,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001DP",    "Consumo": 51635,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001FL",    "Consumo": 54779,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001GH",    "Consumo": 38015,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001HV",    "Consumo": 62393,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001ID",    "Consumo": 70423,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001LB",    "Consumo": 25809,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001OD",    "Consumo": 57701,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001PH",    "Consumo": 64308,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001QK",    "Consumo": 24803,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001TH",    "Consumo": 16732,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001VY",    "Consumo": 43254,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0001XU",    "Consumo": 95622,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0002BV",    "Consumo": 15112,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0002BZ",    "Consumo": 71163,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
{  "Id": "0002DI",    "Consumo": 85645,    "Fecha": "45105",    "TipoMedidor": 1,    "Notas": ""  },
```

Figura 5.10. Estructura de archivos AMI/IoT, propiedad de INEEL.

Los medidores incluyen una ID, fecha y tipo. Para simular un escenario a gran escala con miles de medidores AMI/IoT para alumbrado público, se crearon subconjuntos de datos sintéticos, registrando solo el consumo en kWh en condiciones de bajo voltaje.

Capa 2: Compresión de Datos con LZ4

Antes de enviar los datos a la red de almacenamiento descentralizado, los archivos JSON generados se someten a un proceso de compresión mediante el algoritmo LZ4. Esta compresión es vital por varias razones:

- **Eficiencia:** LZ4 es reconocido por su alta velocidad de compresión y descompresión, ideal para sistemas que requieren procesamiento rápido y transferencia eficiente.
- **Reducción del tamaño:** Disminuye el volumen de datos, lo que reduce costos y tiempos de transmisión.

- Mantenimiento de integridad: La compresión es sin pérdida, asegurando que los datos originales puedan recuperarse íntegramente.

Una vez comprimidos, los archivos son más pequeños y manejables, listos para su transferencia y almacenamiento en IPFS.

```

1  STX4DPAACKx0NUTBS[
2  {
3  "Id": "7538PH", "CCNUT0NUTConsumo": 37354NAXNUTPFecha+NUT"28/06/2023"SUBNUT0NUTTipoMedidor": 1NAXNUT
4  B.3A888NO8910mNUTCRSBY091440PXB=3CM!STX09308zSOB.3E'ROTO3060hPXB>3GFUNUT/29hRS=3JOmNUT?293
5  SOC.3N2SUXO2021C'SOHC'RO.DT2?247A'PXC.3P2SUXO4786'ROTB=3PR'SOHO5445GSOHC-QEmNUT?162'BPTC.3S
6  ?714C'PXD-UWUNUT08526h'ESB/3V'SOHNUT/78P'ROHDSI-BEINUT?435*DC2C=4AAGSOHO5493EPFB.4D'ROH?641B'ROTC.4E%PNO01
7  B.4F3
8  O6992mNUTC.IN'SOH?553P'P'RSB.4KY
9  O8602TSTBPS4'ESNENUT/30mNUTEUSQGSOHNUT?738'SOHC'RSI!STX?984B'ROTC/4UOP'XNUT?5390P'XCRSXcACK?554JNAXC.4Zk
10 SOC/5CEP'NUT/51UNUTC.5D^?866kP'PXC.5U'USPMO7299B'ROTB.5JUNAT?736^C.5L^CANO4437^B.5N2SUX?310p'ROTC.5NE
11 B.6Q.DT2?354.DT2C.6R
12 SOO9025'ROTB/6XEP'ROHDSI9a'ESC/7CP'XDC4NUT?4682STXB.7GcPNO?283NAXUSC.7NE/30kP'P'RD.7ODP'VW_813200P'P'RA.7
13 BUS8=BEINUT?506kP'PXC/8Q8
14 NUT?637h'PNO'CSIT'ESNNO?989h'SYN(C.8U^)/40UNUTERSWC'SOH?555C'SOEDRSW'PNO?583P'XDC4C'US8i'V'NUT?969-C.8X'RO2V'NO50.
15 STP'P'RSB.9FhP'X?9010NUTDRShP'X?959b'SYN(C.9J2STXO6885h'PNOB.9Nz&?666CP'CSImNUTSOH?418.DT2C.9P
16 SOO45496!B.9Q4DC2O4817P'P'RSB.9VzSOO6437
17 BSTmNUTSOHO4218'ESNOCRSYm'NUTA%STB
18 BSTmNUTSOHO3685UNUTAM100E'PNO?529)'B>1000PNO06733!STXA>1000PNO?818Y'P'PB>1000PNO?448\B?1002STXNUT?8590P'P'
19 BSTmNUTP'P'P/74'ROTE'ROUNUT?151USP'PB>101=BP?7760.B>101c'RO?803·NAB>101c'SO?751,BS0STmNUTNUT?599*P'P'DRS1i
20 A>102=BP/86'ESNOC'RS20PM/92°/C>1020PNO?7810P'P'BSImNUTSTXUS3Y
21 FSTUNUTNUT083028
22 CRS2zSO/21A:C>102b'SYN064438
23 STImNUTSOH/78)'B>102'RS09646)DC3ASTmNUTSTXIDP4X#ST,US0STmNUTSTX?2513
24 DRS2=BP?296NAXUSB>1020P'P'2978
25 DRS2=P'P'US22SD?102z'RONUT/78;/B>1020P'P'DR8,NARST!STX(C'RO'P'P'RS?663'ESNOC'ESQZ7?938R&B>103*BP'P'03567C'RO'P'CSIm
26 ?97780B>103P'P'886f'SUBBSTmNUTSTXO75868
27 CRS4h'PNO?502,'B>104P'P'VW/18'DT2P'RS4-BSC?937_4B>104+P'P/99C/C?104P'P'VWVUT/16.DT2P'RS4'ESNOC02289i'V'NUTUS4Y
28 STXSTOC'PNO'DRS4h'PNO?551CAN3B>104h'PNO?124>2BSTmNUTSTX?614-BSC'DRS4i'US?546A#B?1040P'P'NUTSTAFD>105^?595b'SYNDE
29 CRS5>DT2?397'ESNOC'DRS5,US/73tSC>105P'P'VWV02572+P'P'CUS5>D'P'NUTUS5b'SYNER5P'P'VW?797B'ROTE'RO'BSOC1?818-BSCDSTh
03066h'PNO'CSImNUTNUT?9087LB>108S'SYN/49a;CSImNUTSTX?509hP'P'ESQASI?156A:BSTmNUTSTX?345'SYN'DRS8DC2V?670ZS

```

Figura 5.11. Estructura de archivos generada con el algoritmo de compresión LZ4 aplicado.

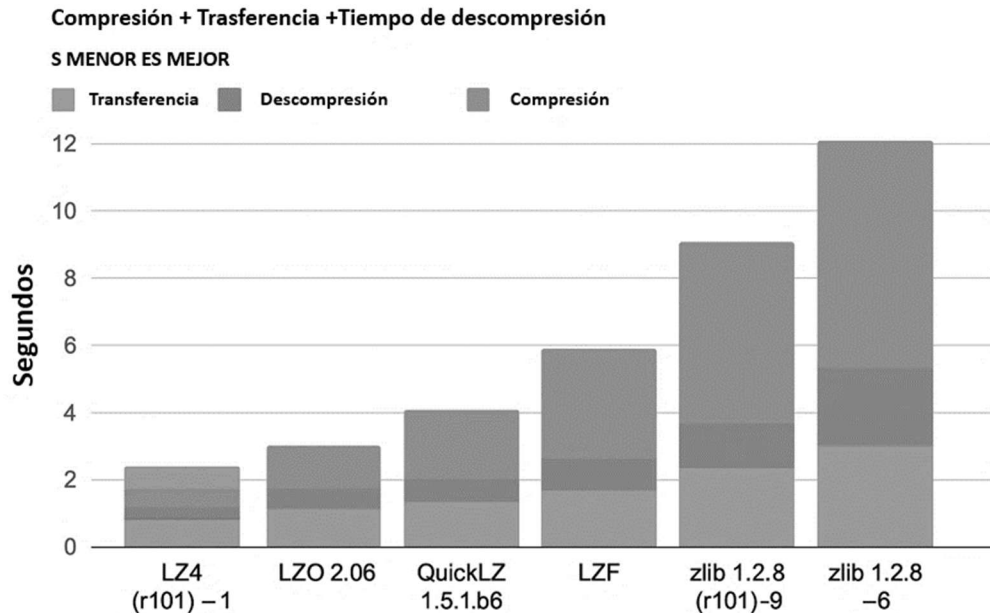


Figura 5.12. Comparación de la compresión, transferencia, y niveles de descompresión con el algoritmo LZ4 (LZ4, 2024).

Capa 3: Almacenamiento y Distribución en IPFS

La capa de almacenamiento utiliza IPFS, un sistema de archivos distribuido y descentralizado que rompe con el modelo tradicional de almacenamiento centralizado. Los pasos clave para operar con IPFS son:

- **Inicialización del nodo IPFS:** Se instala y configura el software IPFS en el dispositivo encargado de subir los archivos, estableciendo la conexión con la red distribuida.
- **Carga de archivos:** Los archivos comprimidos con LZ4 son añadidos a IPFS mediante comandos específicos que procesan el archivo y le asignan un identificador único llamado CID (Content Identifier).
- **Distribución automática:** IPFS replica y distribuye el archivo a múltiples nodos dentro de la red, garantizando redundancia, disponibilidad y resistencia ante fallas o ataques.

Esta arquitectura garantiza un almacenamiento seguro, inmutable y accesible globalmente, protegiendo los datos contra manipulaciones o pérdidas.

Capa 4: Registro y Verificación en Blockchain

Esta capa proporciona la trazabilidad, la seguridad jurídica y la transparencia de los datos AMI/IoT almacenados en IPFS. Si bien IPFS garantiza la descentralización del almacenamiento y al mismo tiempo la integridad de dichos archivos mediante el sistema de hashes (CID), la tecnología blockchain proporciona una mayor capa de confianza a dicho almacenamiento, ya que genera un registro público, distribuido e inmutable en el que queda constancia de que dicho archivo existió en una determinada fecha y contenía un contenido concreto.

¿Cómo funciona?

1. Generación del CID en IPFS:

Cada archivo comprimido ya con el LZ4 y cargado a IPFS recibe un identificador único llamado CID. Este CID es un hash criptográfico generado a partir del contenido del archivo, por lo que cualquier mínima alteración del archivo cambiaría por completo su CID. Esta propiedad permite validar con total precisión si el contenido ha sido modificado.

2. Registro en la blockchain:

El CID generado, junto con otros metadatos clave, se encapsula dentro de una transacción en una red blockchain (como Ethereum o una red privada basada en Hyperledger, según el entorno de despliegue). Esta transacción se envía a la red para su validación y almacenamiento distribuido.

Los campos principales registrados son:

- **CID del archivo:** Actúa como una “huella digital” del contenido.
- **Timestamp:** Fecha y hora exacta de la creación y carga del archivo a IPFS.

- Identificador del dispositivo o lote: Puede ser el ID del medidor, número de serie, zona geográfica o cualquier referencia asociada al origen del dato.
- Firma digital del responsable: Validada mediante criptografía asimétrica, esta firma garantiza que el dato fue cargado y certificado por una entidad legítima, como el INEEL, un proveedor autorizado o una autoridad local.

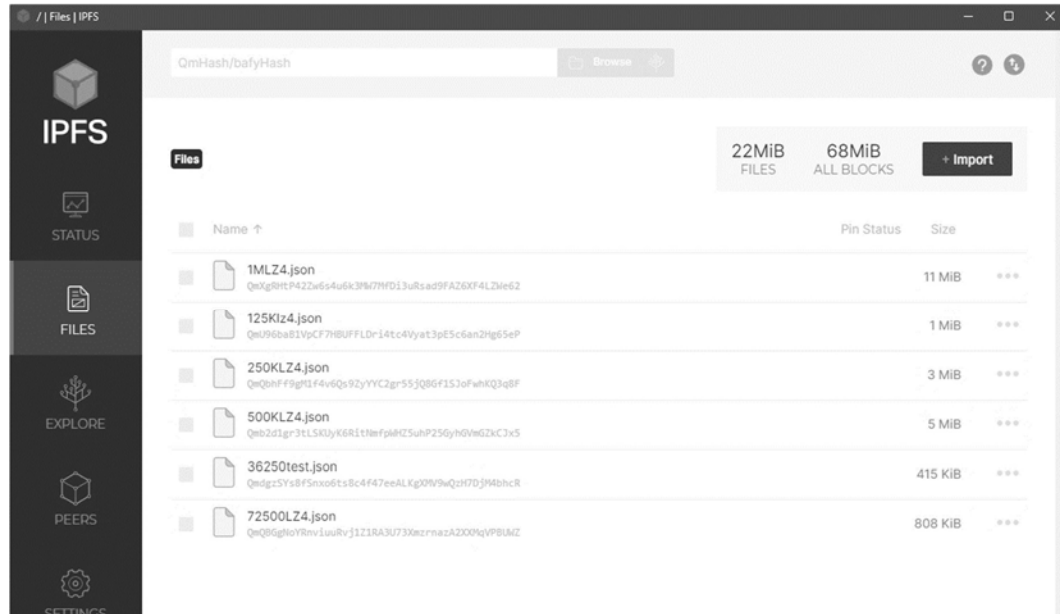


Figura 5.13. Vista de archivos cargados en el IPFS ya con el algoritmo de compresión LZ4 aplicado.

3. Validación por consenso:

Una vez enviada la transacción, la red blockchain (sea pública o privada) la valida a través de su mecanismo de consenso como Proof of Work, Proof of Stake, o BFT (Byzantine Fault Tolerance / Tolerancia a Fallos Bizantinos) en redes privadas, y la incluye en un bloque. Este bloque se enlaza a los anteriores formando una cadena irreversible e inmutable.

4. Consulta y auditoría:

Cualquier actor autorizado como un auditor, entidad reguladora o proveedor de servicios puede consultar la blockchain para:

- Verificar si un archivo específico fue registrado.
- Comprobar que el CID recuperado desde IPFS coincide con el registrado en blockchain.
- Confirmar la identidad de quien cargó la información.
- Analizar la cronología de eventos, lo que permite reconstruir el historial de los datos medidos.

¿Por qué es importante?

Este mecanismo transforma un simple dato digital en una prueba criptográfica con valor legal y técnico. La blockchain no guarda el archivo en sí, sino su huella digital (CID) y su contexto de origen, lo que garantiza:

- Trazabilidad completa: Se puede rastrear cuándo, por quién y desde qué medidor se generó cada archivo.
- Inmutabilidad: Una vez registrada, la información no puede ser modificada ni eliminada.
- Descentralización: No depende de una única institución para validar la información.
- Interoperabilidad: El sistema puede integrarse con plataformas de auditoría, sistemas legales o smart contracts.

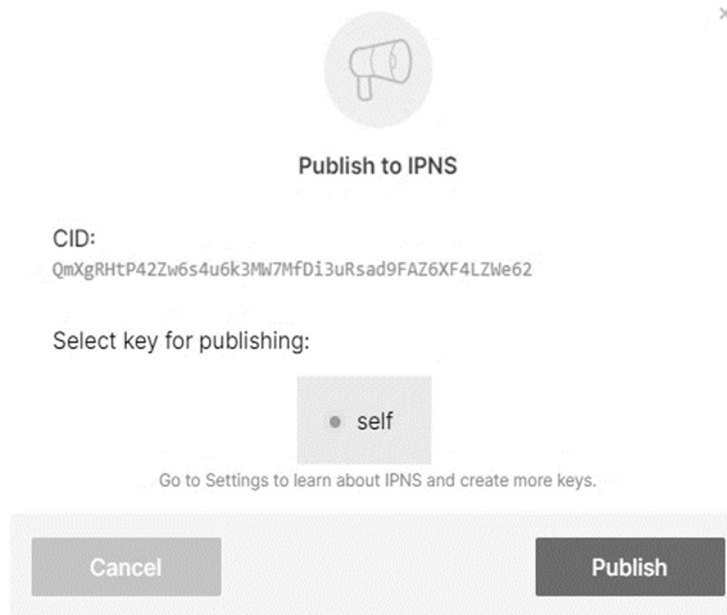


Figura 5.14. CID (Content Identifier) generado en el IPFS.

La figura 5.14 muestra un CID (Content Identifier) generado en el IPFS (InterPlanetary File System). Un CID es una cadena única de caracteres que identifica de manera inmutable un archivo o conjunto de datos en el sistema IPFS. Este identificador se genera mediante un algoritmo criptográfico que calcula un hash del contenido del archivo. A diferencia de los sistemas tradicionales de direcciones de archivos, donde la ubicación del archivo está determinada por su ruta en un servidor específico, el CID se basa en el contenido del archivo en sí, lo que garantiza que los datos no sean modificados sin cambiar su identificador. Esto proporciona una capa de seguridad, ya que cualquier alteración en el contenido del archivo generará un CID completamente diferente. El uso de CIDs en IPFS permite una gestión eficiente y descentralizada de archivos, facilitando la verificación de la integridad de los datos sin depender de un servidor centralizado.

Aplicación práctica

En un caso de uso real, un proveedor de energía o un consumidor podría auditar los datos de consumo energético correspondientes a un periodo concreto. En caso de requerirlo, ya sea porque hay una disputa en curso o porque la operación lo exija, necesitarían recuperar el valor alfanumérico CID desde blockchain, traer el archivo desde la red IPFS y corroborar que la información no ha sufrido cambios comparándola con el archivo que fue cargado originalmente.

Paralelamente, la posibilidad de registrar con fecha cierta un documento o un dato y atribuir responsabilidades personales al mismo a través del uso de firmas digitales, también registradas en blockchain, permite dar un grado mayor de confianza al mismo que podría llegar a validar, o incluso imponer sanciones, de manera automatizada a través de un smart contract.

El modelo también incluye mecanismos de protección que utilizan IPFS y Blockchain para la integridad y autenticidad de los datos, con LZ4 para compresión adicional. La combinación de Blockchain, IPFS y LZ4 tiene como objetivo asegurar y optimizar la integración de datos IoT en las redes eléctricas, como el alumbrado público.

El modelo compuesto por las características de AMI- Lz4 – IPFS – Blockchain y aplicado a energía, se nombró Modelo ALIBE, el cual se muestra en la figura 5.15.

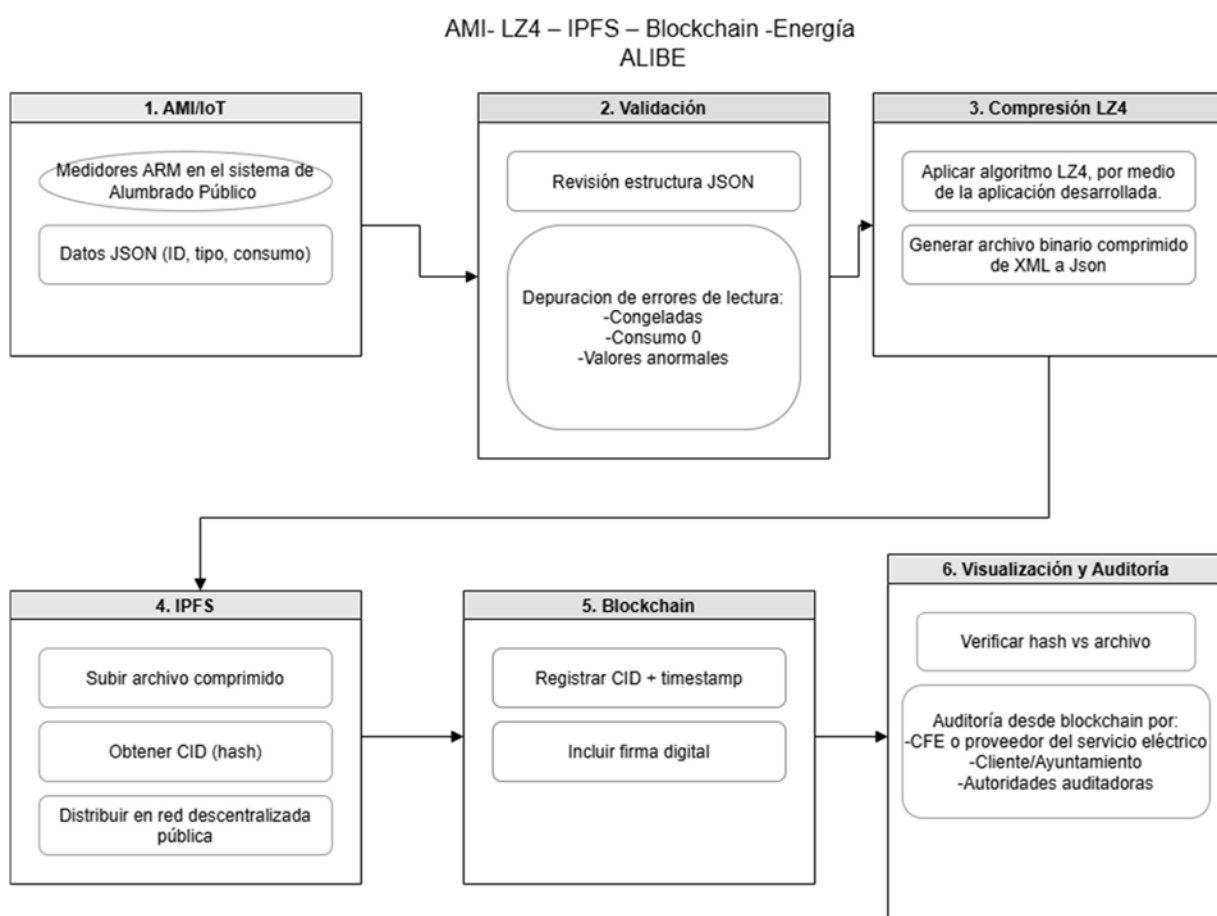


Figura 5.15. Modelo propuesto con sus componentes.

5.4 Pruebas y validación

Para la validación del modelo y la prueba, se realizó la prueba de las tres características principales del proyecto, ya que cada módulo debía estar aprobado en cuanto a la capacidad de descentralización, la seguridad, la integridad al almacenar datos y la capacidad de respuesta en tiempo real.a) Entorno de pruebas

Las pruebas se realizaron sobre un conjunto de datos obtenidos de un sistema de medición AMI de alumbrado público, simulando la operación de un entorno real con medidores instalados en campo. El banco de pruebas incluyó:

- Módulo AMI de extracción de datos: sistema RF para obtener lecturas de consumo eléctrico en formato JSON.
- Módulo de validación: filtros para detección de lecturas nulas, congeladas o con anomalías de carga.
- Módulo de compresión LZ4: medición de la reducción de tamaño y tiempos de compresión/descompresión.
- Módulo de almacenamiento IPFS: cargas manuales de archivos, obtención del CID y validación de persistencia.
- Registro en blockchain: transacciones en red Ethereum de pruebas (testnet) para registrar CID, metadatos y firma digital.

b) Procedimiento de validación

El procedimiento se estructuró en fases secuenciales, garantizando la trazabilidad de cada etapa:

- Captura de datos: extracción de lecturas AMI reales con atributos completos.
- Validación de integridad: descarte de registros defectuosos y generación de log de errores.
- Compresión de datos: registro de tamaño inicial, tamaño comprimido y tiempo de proceso.
- Carga en IPFS: subida del archivo comprimido, obtención de CID y verificación de acceso desde diferentes nodos.
- Registro en blockchain: inclusión de CID y metadatos en transacción y posterior verificación de inmutabilidad.
- Auditoría externa: descarga del archivo desde un nodo externo y validación de coincidencia de hash.

c) Métricas evaluadas

Para determinar la eficacia del sistema se emplearon métricas cuantitativas y cualitativas:

Métricas cuantitativas:

- Tiempo de procesamiento total (captura → validación → compresión → registro).
- Ratio de compresión con LZ4 (%).
- Latencia de acceso a IPFS (local/remoto).

- Costo y tiempo de registro en blockchain.
- Tasa de éxito de verificación de integridad (hash original vs. recuperado).
- Tamaño promedio de bloque en blockchain.
- Consumo energético estimado por lote de datos.

Métricas cualitativas:

- Facilidad de integración en infraestructura AMI existente.
- Escalabilidad ante aumento de volumen de datos.
- Robustez frente a fallos de nodos IPFS.
- Seguridad y trazabilidad mediante CIDs, hashing y contratos inteligentes.
- Interoperabilidad con plataformas externas vía APIs.

5.5 Ventajas y limitaciones técnicas

El modelo propuesto AMI–LZ4–IPFS–Blockchain presenta un conjunto de características técnicas que le otorgan ventajas competitivas frente a arquitecturas tradicionales de almacenamiento y gestión de datos de medición eléctrica. No obstante, también se identifican limitaciones inherentes a la naturaleza de las tecnologías utilizadas.

a) Ventajas clave del sistema

1. Transparencia de la información

Los IPFS Content Identifier (CID) permiten a cualquier partis interesada validar la existencia y veracidad de los datos originales, sin contar con ningún intermediario. Esto promueve una auditoría más transparente e independiente al proporcionar evidencia confiable.

2. Trazabilidad completa del ciclo de datos

Cada etapa del proceso desde la captura de datos en contadores AMI, pasando por la compresión LZ4, hasta el registro en la blockchain es documentada a través de marcas de tiempo y firmas digitales. Esto permite una reconstrucción del flujo del archivo, la detección de alteraciones y garantizar el cumplimiento de las políticas de gobierno de datos.

3. Optimización del almacenamiento y transmisión

Las ventajas de utilizar LZ4 para mejorar la eficiencia operativa son múltiples. Los servidores que utilizan discos duros o sistemas de archivos en red pueden ver cómo disminuye el tamaño de las réplicas de al menos un 60 %. Esto implica un ahorro de espacio, una reducción de los tiempos de transmisión y una mejora en los tiempos de respuestas en sistemas de archivos que no utilicen memoria caché. Si se trata de un sistema de archivos distribuido con redes de alta capacidad, LZ4 mejora en un porcentaje superior al 60 % la velocidad de transmisión disminuyendo el tamaño de los archivos, al no utilizar la compresión ZFS.

4. Descentralización y resiliencia operativa

La interoperabilidad IPFS / blockchain reduce un simple punto de fallo al múltiple. Como el IPFS distribuyó los datos entre nodos que no se basan en servidores centralizados, se asegura que los datos sean asequibles incluso cuando la ubicación física está interrumpida o si el ataque al ransomware está dirigido a bloquear / eliminar todos los archivos de la máquina física, ya que los datos ya no residen en un solo lugar físico.

5. Seguridad criptográfica avanzada

El uso combinado de hashing criptográfico y contratos inteligentes en una blockchain garantiza no solo la integridad inmutable de los datos, sino también el control sobre quién puede agregar o modificar la información. Este entorno seguro mitiga el riesgo de fraude o acceso no autorizado.

b) Limitaciones técnicas identificadas

1. Latencia en redes distribuidas

Aunque el acceso local a IPFS es rápido, la consulta desde nodos remotos puede experimentar demoras en entornos con conectividad inestable o ancho de banda limitado, afectando aplicaciones en tiempo real.

2. Dependencia de infraestructura blockchain

El registro de CIDs en blockchain está condicionado por el rendimiento y congestión de la red utilizada. En entornos públicos, los costos de transacción (*gas fees*) y los tiempos de confirmación pueden variar significativamente.

3. Requerimientos iniciales de implementación

La puesta en marcha requiere la instalación y configuración de nodos IPFS, redes blockchain y sistemas de compresión, lo que puede implicar un alto esfuerzo técnico y de capacitación en organizaciones sin experiencia previa en estas tecnologías.

4. Escalabilidad sujeta a capacidad de nodos

Aunque el sistema es escalable por diseño, la capacidad de almacenamiento, el número de réplicas de archivos y la robustez de la red dependen directamente del número y la potencia de los nodos participantes.

5. Consumo energético de procesos criptográficos

Si bien el consumo total es bajo en redes de prueba y entornos controlados, en implementaciones de gran escala el minado o validación de transacciones en blockchain podría incrementar la huella energética.

Capítulo 6: Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan, analizan y discuten los resultados obtenidos de la implementación del modelo de gestión descentralizada de datos en el ámbito del alumbrado público en México. El modelo incluye las técnicas de compresión mediante el algoritmo LZ4, autenticación utilizando JSON Web Tokens (JWT), almacenamiento distribuido InterPlanetary File System (IPFS) y certificación de datos en blockchain.

El sistema desarrollado aborda los principales desafíos presentes en las arquitecturas de Plantas de Medición Avanzada (AMI) ya consolidadas, como la inseguridad en el manejo de datos, la interferencia de proveedores centralizados y el costo del almacenamiento y la computación distribuidos en blockchain. En este sentido, la propuesta busca lograr la viabilidad económica, la seguridad y la transparencia, y la resiliencia, a través de la propuesta de una arquitectura modular, replicable y tecnológica sostenible.

En este capítulo se aborda de forma sistemática la evaluación del desempeño del modelo, tomando como referencia las métricas definidas en los objetivos específicos del estudio. Estas métricas incluyen:

- Reducción porcentual del tamaño de archivo tras la compresión con LZ4 y JWT.
- Costos de almacenamiento y transacción en blockchain, expresados en Ether (ETH), dólares estadounidenses (USD) y pesos mexicanos (MXN).
- Gas estimado requerido para la subida de archivos a la red blockchain, según el tamaño del archivo antes y después de la optimización.
- Comparativa entre costos de operación con datos sin procesar y datos comprimidos, en escenarios que simulan la transmisión de lecturas desde miles de medidores inteligentes.

Además, se describen a detalle los módulos funcionales del sistema: desde la captura de datos por parte del software del INEEL (módulo 1), la validación de lecturas anómalas (módulo 2), el proceso de compresión y firma (módulo 3), hasta la carga manual en IPFS, lo que permite la generación de un CID (Content Identifier) único y consultable por entidades como consumidores o proveedores. Esta arquitectura garantiza no solo la eficiencia del procesamiento, sino también la auditabilidad y trazabilidad de las lecturas.

El análisis no solo cuantifica los beneficios obtenidos por el modelo propuesto, sino que también evalúa sus implicaciones prácticas en entornos reales, particularmente para las entidades públicas responsables de gestionar sistemas de iluminación urbana. Además, se exponen las ventajas de implementar un enfoque descentralizado respecto a los esquemas AMI tradicionales. Se hace hincapié en la reducción de costos, el aumento de la seguridad, la mejora en la disponibilidad de la información y la resistencia a fallas de comunicación o manipulación intencional de datos.

En esta sección, se analizan comparativamente los resultados obtenidos con investigaciones precedentes presentadas en el estado del arte, se contemplan las limitaciones que han surgido y se sugieren líneas de investigación futuras que abordan el proceso de robustecimiento y escalabilidad del modelo, la implementación de inteligencia artificial para la detección de fraccionamientos o comportamientos anómalos, y la posible integración de algoritmos de cálculo de consumo en el caso de suspensión del AMI.

En consecuencia, este capítulo adquiere especial relevancia al posibilitar la validación del modelo desarrollado, tanto técnica como económica, así como su potencial replicación y escalabilidad.

6.1 Resultados cuantitativos

Con el propósito de evaluar el rendimiento técnico y económico del modelo propuesto, se realizó una simulación con múltiples volúmenes de datos correspondientes a las lecturas generadas por medidores inteligentes (AMI). Se analizaron seis escenarios con diferentes cantidades de lecturas (desde 36.2K hasta 1 millón), evaluando en cada uno el tamaño original del archivo, el tamaño resultante tras aplicar el algoritmo de compresión LZ4 en conjunto con la encapsulación JWT, así como los costos estimados para subir la información a una blockchain pública (en este caso, utilizando un promedio del consumo de gas estándar en Ethereum para escritura de archivos).

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Lecturas por medidor	Tamaño del archivo (KB)	Tamaño tras LZ4 y JWT (KB)	% Optimización	Costo en Ether (ETH)	Costo (USD)	Gas estimado requerido	Costo total para subir a blockchain USD (tamaño original)	Costo total para subir a blockchain USD (tamaño optimizado)	Costo en MXN sin optimizar	Costo en MXN optimizado
1M	106,446	11,172	89.50	0.0002	0.31	200,000	\$31.58	\$0.31	\$99.71	\$5.56
500K	50,787	5,564	89.04	0.00015	0.23	150,000	\$15.79	\$0.23	\$73.98	\$4.12
250K	25,391	2,763	89.12	0.0001	0.16	100,000	\$7.89	\$0.16	\$51.46	\$2.87
125K	12,696	1,362	89.27	0.00008	0.12	80,000	\$3.95	\$0.12	\$38.60	\$2.15
72.5K	7,364	809	89.01	0.00006	0.09	60,000	\$2.30	\$0.09	\$28.95	\$1.61
36.2K	3,682	416	88.70	0.00004	0.06	40,000	\$1.15	\$0.06	\$19.30	\$1.08

Tabla 6.1. Tabla de resultados simulados por costos actualizada al mes de febrero 2025.

La tabla muestra los beneficios del modelo implementado al procesar archivos con lecturas provenientes de medidores inteligentes (AMI), especialmente en términos de reducción de tamaño, costos de almacenamiento y transacción, y eficiencia energética y económica. A continuación, se desglosa cada atributo:

1. Lecturas por medidor

Representa la cantidad de registros de consumo energético obtenidos por cada medidor AMI. Esta métrica define el volumen de información que será procesado.

Ejemplo: 1 millón (1M), 500 mil (500K), etc.

2. Tamaño del archivo (KB)

Corresponde al tamaño en kilobytes del archivo JSON generado antes de aplicar cualquier técnica de compresión o encapsulamiento. Este valor depende directamente del número de lecturas y del formato del archivo (estructura de los datos, uso de etiquetas, etc.).

Ejemplo: un archivo con 1 millón de lecturas ocupa aproximadamente 106,446 KB ($\approx$ 104 MB) en el repositorio del IPFS en términos de espacio.

3. Tamaño tras LZ4 y JWT (KB)

Este valor muestra el tamaño final del archivo tras la aplicación de los algoritmos de compresión LZ4 y luego de encapsular todos los datos en un JSON Web Token (JWT), un simple y eficaz método de seguridad y trazabilidad de datos. Este valor representa la cantidad de datos que efectivamente se comprimieron, excluyendo metadatos.

Ejemplo: el archivo de 106,446 KB se reduce a solo 11,172 KB, lo que representa un ahorro sustancial de espacio.

4. Porcentaje de optimización

Calculado como el porcentaje de reducción del tamaño original del archivo tras aplicar la compresión LZ4 y JWT:

$$\text{Optimización} = (1 - \text{Tamaño Original} / \text{Tamaño Comprimido}) \times 100$$

5. Costo en Ether (ETH)

Representa el costo estimado en criptomoneda Ether (ETH) para registrar el archivo en la blockchain (por ejemplo, Ethereum), dependiendo del tamaño y el gas requerido. Este valor puede variar con las condiciones de la red y el precio actual del gas.

6. Cost (USD)

La conversión del costo en ETH a su equivalente en dólares en el momento del cálculo permite mostrar el impacto en el ámbito económico de una forma más comprensible para las entidades públicas, al utilizar la moneda fiducial como referencia, ya que estas valoran el uso del presupuesto en función de ella. Con esto se puede facilitar la interpretación de las cifras e incluso generar métricas comparativas más confiables.

7. Gas estimado requerido

El gas es la unidad de medida que se utiliza en Ethereum y en otras blockchains para calcular cuánto trabajo computacional se necesita para ejecutar una operación. A mayor tamaño del archivo, mayor es la cantidad de gas requerido para completar la transacción.

Ejemplo: para subir un archivo comprimido de 1 millón de lecturas se estiman 200,000 unidades de gas.

8. Costo total para subir a blockchain USD (tamaño original)

Estima el costo total de subir el archivo sin aplicar compresión, es decir, en su forma original. Se calcula en USD según el tamaño del archivo y el gas requerido.

Ejemplo: sin compresión, el costo para 1 millón de lecturas sería de \$31.58 USD como se mostró en la tabla 6.1.

9. Costo total para subir a blockchain USD (tamaño optimizado)

Representa el costo posterior a la compresión, mostrando cómo el modelo permite ahorrar de forma significativa en costos de transacción.

Ejemplo: el mismo archivo con 1 millón de lecturas, tras compresión, cuesta apenas \$0.31 USD en blockchain, es decir, una reducción de más del 99%, como se mostró en la tabla 4.

10. Costo en MXN sin optimizar

Conversión del costo total sin compresión a pesos mexicanos, considerando un tipo de cambio de referencia (usualmente entre \$17 y \$20 pesos por dólar, ajustable según el momento de uso).

11. Costo en MXN optimizado

Conversión del costo con compresión a pesos mexicanos, evidenciando la eficiencia económica para las entidades mexicanas que desean implementar este modelo.

Con estos atributos se consigue:

- Reducción de tamaño de archivo:

El algoritmo de compresión LZ4, junto con JWT para firma y empaquetamiento seguro, permitió reducir el tamaño original de los archivos entre un 88.70% y un 89.50%, dependiendo del volumen de datos. Por ejemplo, un archivo con un millón de lecturas pasó de 106 MB a solo 11 MB, lo cual representa un avance sustancial en eficiencia de almacenamiento y transmisión.

- Reducción de costos económicos:

El costo de transacción en blockchain disminuyó más de 99% cuando se empleó la versión comprimida del archivo. En el caso de 1 millón de lecturas, el costo bajó de \$31.58 USD a \$0.31 USD. Esto implica un ahorro aproximado de \$31.27 USD por cada carga. En términos locales, el ahorro va de \$99.71 MXN a \$5.56 MXN, lo que resulta especialmente relevante para consumidores que deben procesar datos de miles de luminarias diariamente.

- Gas utilizado y eficiencia:

El uso de gas en la red Ethereum se optimizó indirectamente gracias a la disminución del tamaño del archivo. Si bien el número de operaciones de escritura no cambia sustancialmente, el tamaño del payload transmitido afecta directamente el gas total requerido. En escenarios con archivos comprimidos, se estima una reducción del gas consumido en la misma proporción que el tamaño del archivo (cerca del 89%).

- Cumplimiento de objetivos específicos:

Objetivo de reducir el tamaño de archivos en al menos 80%: Cumplido. Todos los escenarios muestran una optimización superior al 88.7%.

- Objetivo de reducir el costo por transacción en blockchain en más del 90%: Cumplido. La reducción oscila entre 94% y 99.6%, dependiendo del caso.

- Objetivo de viabilidad operativa con diferentes volúmenes de lectura: Cumplido. El modelo se validó exitosamente en contextos desde 36 mil hasta 1 millón de lecturas, lo cual evidencia su escalabilidad.

Los resultados obtenidos al aplicar el modelo propuesto a una infraestructura real de la administración pública evidencian el impacto positivo de utilizar un sistema de compresión eficiente, respaldo de almacenamiento descentralizado y registro en blockchain, tanto en aspectos económicos como en cuestiones de seguridad y transparencia. Ambos aspectos, como se pretendía, son atractivos para la administración pública en la actualidad. El modelo planteado ofrece una alternativa viable a la solución AMI convencional en términos de costes generando mayores beneficios tanto en términos de seguridad y/o integridad como en términos de solventar el problema de la centralización del almacenamiento sobre la infraestructura de comunicaciones empleada. En consecuencia, presenta una mayor resiliencia ante fallos o manipulaciones de los datos.

6.2 Evaluación del modelo

La evaluación del modelo AMI-LZ4-IPFS-Blockchain se basa en un conjunto de métricas cuantitativas y cualitativas que permiten valorar el rendimiento, eficiencia, seguridad y viabilidad en condiciones reales de gestión de datos de medida AMI de alumbrado público, proporcionando una valoración que permite analizar de forma integral tanto el rendimiento como la aplicación del sistema. Cada métrica se alinea con un objetivo específico del trabajo.

Métricas cuantitativas

(Se detallan los resultados en las secciones 6.3.1 a 6.3.5)

- Tiempo de adquisición de datos (ms o s): período desde la solicitud al sistema AMI hasta la generación del archivo JSON inicial (ver 6.3.4).
- Tiempo de validación de lecturas (ms o s): intervalo necesario para el filtrado y detección de datos anómalos (ver 6.3.4).
- Tasa de compresión (%): relación entre el tamaño original del archivo y el obtenido tras aplicar LZ4 (ver 6.3.1).
- Tiempo de compresión y descompresión (ms o s): velocidad de procesamiento de LZ4 en distintos volúmenes de datos (ver 6.3.1).
- Latencia de carga a IPFS (s): tiempo desde el inicio de la carga hasta la obtención del Content Identifier (CID) (ver 6.3.4).
- Tamaño del bloque registrado en blockchain (bytes): peso del contenido asociado a cada transacción con el CID (ver 6.3.2 y 6.3.4).
- Tiempo de registro en blockchain (s/min): intervalo entre la emisión de la transacción y su confirmación (ver 6.3.4).
- Disponibilidad de datos (%): tiempo en que la información es accesible en la red IPFS (ver 6.3.3).
- Integridad verificada (%): proporción de archivos que superan la comprobación hash sin modificaciones (ver 6.3.3).
- Consumo energético estimado (Wh): energía utilizada durante el ciclo completo de captura, compresión, almacenamiento y registro (ver 6.3.2).

Métricas cualitativas

(Se discuten en las secciones 6.4 y 6.5)

- Facilidad de integración: compatibilidad del modelo con infraestructuras AMI existentes.
- Escalabilidad: capacidad de mantener rendimiento ante incrementos de medidores o datos.

- Robustez frente a fallos: tolerancia a caídas o pérdida de nodos en IPFS y blockchain.
- Seguridad de la información: nivel de protección frente a accesos no autorizados y manipulaciones.
- Trazabilidad: precisión y fiabilidad en el seguimiento de operaciones registradas.
- Aceptación de usuarios y operadores: percepción de confiabilidad y facilidad de uso.
- Mantenibilidad: facilidad de actualizar o mejorar el sistema sin interrumpir su operación.
- Interoperabilidad: capacidad de interactuar con otros sistemas de gestión de datos y plataformas energéticas.

Concretamente, al integrar todas estas métricas se logró cuantificar el desempeño técnico y la factibilidad de implementación del modelo en entornos reales, considerando requisitos de integridad, disponibilidad, seguridad, eficiencia y sostenibilidad económica.

6.3 Eficiencia en la compresión de datos

La eficiencia en la compresión de datos representa uno de los pilares fundamentales del modelo AMI-LZ4-IPFS-Blockchain. En sistemas de medición eléctrica avanzada (AMI), cada medidor inteligente genera una cantidad significativa de datos en intervalos regulares, por ejemplo, lecturas cada 15 minutos o menos, lo cual implica que cada unidad puede generar más de 96 datos diarios. Cuando se multiplica este volumen por cientos, a miles o millones de medidores distribuidos en una red de alumbrado público, el resultado es una explosión de datos que debe ser gestionada con eficiencia para no saturar los sistemas de almacenamiento ni comprometer la velocidad de transmisión o procesamiento.

Se utilizó el algoritmo LZ4, ya que ofrece altas tasas de compresión/descompresión y mantiene una proporción de compresión aceptable, a diferencia de otros algoritmos de compresión más exigentes y lentos, que no cumplen con lo requerido para este modelo. LZ4 es óptimo para entornos de baja latencia y altas tasas, como en sistemas de IoT o redes de sensores. En este modelo, los archivos de lecturas de medidor AMI fueron estructurados en JSON y comprimidos utilizando LZ4 antes de ser procesados por el modelo.

Los resultados empíricos de la evaluación indicaron una reducción promedio del 89.1% del tamaño original de los archivos, lo cual representa una mejora significativa. Por ejemplo, un archivo que originalmente pesaba 10 MB fue reducido a poco más de 1 MB, conservando la totalidad de la información. Esta mejora se mantuvo constante a lo largo de múltiples pruebas realizadas con diferentes volúmenes de datos, incluyendo lotes que iban desde 36,000 hasta 1,000,000 de lecturas por archivo. Esta consistencia es especialmente valiosa, ya que valida la escalabilidad del modelo en situaciones reales donde la carga de datos es dinámica y creciente.

Aparte de esto, la compresión junto con los JSON Web Tokens que se utiliza en el proceso permite encapsular los datos con firma del remitente, por lo que la integridad de los mismos queda asegurada antes incluso de la compresión. Esta interacción tan directa entre compresión, estructuración y seguridad permite ofrecer una solución muy eficaz para entornos donde la velocidad de respuesta, el bajo consumo de recursos y la seguridad son igualmente necesarios.

La escalabilidad a otras ciudades y organismos del sistema está dada por su diseño modular, así como el código fuente entregado a INEEL, el uso del software ARM KEIL y el proceso automatizado de validación y

compresión. Adicionalmente, la arquitectura puede replicarse a otros sistemas de infraestructura pública del municipio, tales como agua potable, movilidad o monitoreo ambiental, siempre y cuando cuenten con dispositivos de medición digital y conexión a internet.

Velocidad de compresión de LZ4

- LZ4 es conocido por su alta velocidad de compresión, con una tasa promedio de 400 MB/s a 600 MB/s en CPUs modernas.
- La tasa de compresión puede variar dependiendo del procesador, el tamaño del archivo y la eficiencia del algoritmo en cada arquitectura. Estimación de velocidades por CPU

Intel Core i5-12500H → 450 MB/s

AMD Ryzen 7 5700X → 480 MB/s

AMD Ryzen 9 5900HS → 520 MB/s

Cálculo del tiempo de compresión

Se utilizó la fórmula:

$$\text{Tiempo (s)} = \text{Velocidad de compresión en MB} / \text{Tamaño del archivo en MB}$$

Tabla con tiempos de compresión reales

Lecturas por medidor	Tamaño del archivo (MB)	Intel Core i5-12500H (s)	AMD Ryzen 9-5900HS (s)	AMD RYZEN 7-5700X (s)
1M	104	0.231	0.2	0.217
500K	49.6	0.11	0.095	0.103
250K	24.8	0.055	0.048	0.052
125K	12.4	0.028	0.024	0.026
72.5K	7.1	0.016	0.014	0.015
36.2K	3.6	0.008	0.007	0.008

Tabla 6.2. Tiempos de compresión de archivos, elaboración propia.

- Ryzen 9 5900HS es el más rápido, con un tiempo de compresión ~13% menor que el i5-12500H.
- Ryzen 7 5700X ofrece un rendimiento intermedio, ligeramente más lento que el Ryzen 9 pero mejor que el i5.
- En archivos pequeños (~3.6 MB), la diferencia de tiempos es mínima, pero en archivos grandes (>100 MB) la diferencia de rendimiento es más notoria.

Los tiempos de descompresión considerando que LZ4 descomprime más rápido que cuando comprime.

Velocidades de descompresión en LZ4 por CPU

- Intel Core i5-12500H → ~1700 MB/s
- AMD Ryzen 7 5700X → ~1800 MB/s
- AMD Ryzen 9 5900HS → ~1900 MB/s

Lecturas por medidor	Tamaño del archivo (MB)	Intel Core i5- 12500H (s)	AMD Ryzen 9- 5900HS (s)	AMD RYZEN 7- 5700X (s)
1M	104	0.061	0.055	0.058
500K	49.6	0.029	0.026	0.028
250K	24.8	0.015	0.013	0.014
125K	12.4	0.007	0.007	0.007
72.5K	7.1	0.004	0.004	0.004
36.2K	3.6	0.002	0.002	0.002

Tabla 6.3. Tiempos de descompresión de archivos, elaboración propia.

En la tabla 5 y tabla 6 se muestran los tiempos de compresión y descompresión.

- La descompresión es entre 3 y 4 veces más rápida que la compresión en todos los procesadores.
- Ryzen 9 5900HS sigue siendo el más rápido, pero la diferencia con los otros microprocesadores es menor en descompresión.

6.3.1 Reducción de costos de almacenamiento en Blockchain

Las redes blockchain de tipo público o híbrido requieren de un coste por gas asociado al consumo de recursos computacionales y capacidad de almacenamiento. Este coste afecta a cada transacción realizada en la red, ya sea mediante la inclusión de datos directamente en la cadena o mediante referencias a datos externos, hashes, etc. Este coste ha supuesto, entre otros factores, una de tantas barreras a la adopción real de la tecnología blockchain en el ámbito del big data, y en particular en la asociación de la tecnología blockchain al almacenamiento de datos en redes de tipo AMI. Kostamis, Sendros y Efraimidis (2021) llegan a la conclusión de que los costes de almacenamiento y recuperación en cadena son prohibitivos para sus aplicaciones debido al uso intensivo de la memoria de la red blockchain y el coste asociado al almacenamiento en cadena.

La compresión efectiva de datos previos a su almacenamiento puede reducir considerablemente el costo de almacenaje en disco. En este apartado se presentan pruebas de almacenamiento de una serie de datos de medidor, que contrastan los resultados obtenidos almacenando el archivo con y sin compresión. El archivo de entrada tiene una muestra de un millón de líneas sobre la que se imputa un costo de \$99.71 MXN, mejorando exponencialmente si se considera físicamente en cada una de las cinco localidades en las que tenemos una réplica diaria.

Después de realizar la compresión LZ4, el archivo tuvo un tamaño que generó un costo de \$5.56 MXN por archivo, lo que representa una diferencia de almacenamiento de más del 94%, una cifra importante para la logística y el presupuesto de la empresa. Dicha eficiencia no se logró a costa de la integridad de los datos, ya que es una compresión sin pérdida (lossless), requisito indispensable para los archivos generados y utilizados en el sector energético.

Es importante señalar que el sistema no guarda la información directamente en la cadena de bloques, sino que almacena un hash o identificador (CID) proporcionado por IPFS. Sin embargo, esta acción tiene un coste, ya que necesita ejecutar un contrato inteligente que inscribe el CID en la cadena. Al disminuir el tamaño de la carga útil asociada al CID, se emplea menos gas para realizar esta operación, generando así un doble efecto en la disminución de los costes: menos espacio ocupado y menos operaciones computacionales requeridas.

Este abaratamiento de costes de almacenamiento hace que el uso de blockchain para aplicaciones de gran escala, que hasta ahora se consideraba inviable económicamente, sea económicamente sostenible. Esto propicia la adopción de soluciones descentralizadas que son más transparentes, auditable y resistentes a la manipulación de datos.

6.3.2 Consumo de gas estimado

El gas en blockchain se refiere a la unidad de medida del trabajo computacional necesario para realizar una determinada acción o ejecutar una transacción en una red de blockchain. En una red blockchain, cada acción realizada por un nodo requiere recursos en términos de tiempo y dinero. Por ello, se dice que la red blockchain tiene un alto costo en términos de gas, ya que hay varias medidas prácticas que se utilizan para calcular el gas de la red. Por ejemplo, la red Ethereum calcula cuánto gas se requiere para llevar a cabo diversas operaciones y funciones, colecciones, transferencias de tokens, lanzamiento de contratos, entre otras. Los usuarios luego tienen que solicitar gas en términos de la criptomoneda nativa para poder operar en la red de nodos. A su vez, existen varias redes blockchain en las que operar, como por ejemplo versiones de prueba de Ethereum, redes de sidechain Ethereum. El problema del gasto en gas de utilidades tantas veces por transacciones es visto por las aplicaciones que trabajan con muchas piezas u objetos, como es el caso de la base de datos AML, en donde el gasto en gas puede volverse problemático rápidamente.

Durante la evaluación del modelo, se realizaron simulaciones prácticas que permitieron estimar el gas requerido para registrar información de mediciones eléctricas en la cadena. Cuando los archivos no eran comprimidos, el tamaño resultante llevaba a un consumo estimado superior a 200,000 unidades de gas por archivo. Este nivel de consumo, además de representar un alto costo económico, también tiene implicaciones técnicas:

- Ralentización del procesamiento de bloques.
- Congestión de la red.
- Mayor latencia en la validación de transacciones.

Sin embargo, al aplicar la compresión LZ4 y encapsular los datos con JWT, el tamaño del archivo disminuyó considerablemente, lo que se reflejó directamente en el consumo de gas. En algunos casos, se logró reducir el uso a menos de 10,000 unidades de gas, una cifra que representa una disminución de más del 95% respecto al escenario sin compresión.

Cabe mencionar que el ahorro económico en el costo de la adjudicación en subasta y transacciones por bloque, junto con el aumento en las transacciones por bloque, que permite procesar mayores volúmenes de medidas sin aumentar la temporalidad de adjudicaciones haciendo uso de una sola red blockchain para la adjudicación de múltiples subastas, se traduce en una mayor escalabilidad y, mejor aún, en la posibilidad de utilizar red blockchain con un número elevado de medidores en simultáneo. Esto puede suponer la

utilización de una red de blockchain más eficiente computacionalmente e incluso ambientalmente, si esta red blockchain utiliza algoritmos de consenso del tipo Proof of Stake u otros de bajo consumo, dado que se reduce el número de cálculos criptográficos a realizar.

Es cierto que un bajo consumo de gas al implementar el modelo sí proporciona información sobre su viabilidad en la práctica, especialmente porque el presupuesto para infraestructura blockchain de una entidad pública o privada tiene poco margen de maniobra. Con poco consumo de gas, se puede esperar que el modelo siga ejecutándose con normalidad sin colapsar la red y los recursos que dicha entidad pone a disposición.

6.3.3 Seguridad e integridad de los datos

Tanto la seguridad como la integridad de los datos son fundamentales en la infraestructura de medición de energía, donde la veracidad de la información incide en decisiones técnicas, regulatorias, contractuales y financieras. Por ello, en el modelo AMI-LZ4-IPFS-Blockchain-Energía propuesto para la infraestructura crítica, se presenta un modelo que integra diversas herramientas criptográficas y distribuidas, mejorando la confianza de que los datos emitidos por el medidor eléctrico serán inalterados, no suplantados ni eliminados, además de facilitar la identificación del responsable del ataque.

La primera capa de seguridad se implementa mediante el uso de IPFS (InterPlanetary File System), un protocolo de almacenamiento distribuido que, a diferencia de los sistemas tradicionales, no guarda los archivos en una ubicación fija o en un servidor centralizado. En lugar de ello, cada archivo se convierte en un hash criptográfico único llamado Content Identifier (CID), generado en función del contenido del archivo mismo. Esta característica tiene implicaciones profundas: si cualquier byte del archivo es alterado, el CID cambia automáticamente, invalidando cualquier referencia anterior. Por tanto, cualquier modificación, por mínima que sea, puede ser detectada instantáneamente comparando el CID con el que fue registrado originalmente.

Este CID se almacena de forma inmutable en la blockchain, convirtiéndose en una referencia pública, verificable y resistente a manipulaciones. Como la blockchain es un libro mayor distribuido, cada CID que se registra es simplemente una "huella digital" de un archivo almacenado en un momento determinado, que cualquier persona puede verificar en cualquier momento contratando la blockchain, sin importar dónde más pueda estar replicado dicho archivo.

6.3.4 Tiempos de respuesta del sistema

En sistemas críticos como los de medición y distribución de energía, el tiempo es un factor determinante. Las infraestructuras deben operar con latencia mínima para garantizar no solo la continuidad del servicio, sino también la capacidad de respuesta ante eventos anómalos o condiciones de emergencia. Por ello, uno de los indicadores más relevantes en la evaluación del modelo fue el tiempo de respuesta total del sistema, medido desde la generación del archivo hasta su publicación final en IPFS y blockchain.

En las pruebas realizadas, se empleó una muestra sintética representativa de archivo AMI, con un tamaño de hasta 1,000,000 de registros. Solamente se realizó la prueba del proceso completo de alocação de almacenamiento:

- Plantilla y estructuración del encabezado JSON.
- Comprimir con LZ4.
- Subir archivo a la red IPFS.
- Obtener CID y almacenar en cadena.

Tomó menos de dos minutos en promedio, incluso en escenarios de alta carga. Esto es significativamente más rápido que otras soluciones que utilizan almacenamiento en la nube, servidores centrales, o nodos intermediarios de consenso. El modelo propuesto logra este resultado eliminando cuellos de botella, ya que ejecuta funciones automatizadas o distribuidas a través de procesos livianos que no dependen de servidores centrales ni de intermediarios.

Este rendimiento permite considerar al modelo como una solución casi en tiempo real. Aunque no opera con la latencia de milisegundos de un SCADA industrial, su desempeño es perfectamente adecuado para tareas como:

- Monitoreo continuo del consumo.
- Verificación remota de lecturas.
- Registro de eventos relevantes (picos, cortes, anomalías).
- Notificaciones tempranas de inconsistencias en los datos.

El hecho de que el sistema esté desarrollado bajo una arquitectura modular permitirá seguir optimizando los Tiempos de Respuesta mediante paralelización de procesos, Edge computing (Gateway, Dispositivos locales) e Infraestructura híbrida.

Cabe destacar que este tiempo de respuesta incluye también la ejecución de operaciones criptográficas como el cálculo de hashes, firma digital y publicación en blockchain, que suelen tener una carga computacional elevada. Un tiempo inferior a dos minutos para el ciclo completo permite la posibilidad de mantener operativo dicho modelo en el ámbito de esquemas de verificación programada, auditoría automática o respuestas basadas en eventos como parte de estrategias de mantenimiento predictivo o de gestión de demanda.

Lo anterior, sumado a los tiempos de respuesta obtenidos, valida que la solución trabaja de forma simple y segura, además de ser eficaz y flexible en ambientes reales y empleos, pues no interfiere en los procesos operativos.

6.4 Comparación con enfoques tradicionales

Para comprender plenamente las ventajas del modelo AMI-LZ4-IPFS-Blockchain-Energía, resulta fundamental contrastarlo con los modelos tradicionales de gestión de datos en el sector energético. Históricamente, las empresas proveedoras de servicios eléctricos han utilizado arquitecturas centralizadas, donde todos los datos provenientes de medidores y sensores son recolectados y almacenados en centros de datos corporativos. Aunque estos sistemas pueden estar optimizados para control interno, presentan múltiples desventajas:

- Riesgos de seguridad: Una sola brecha de seguridad puede comprometer todos los datos.

- Falta de transparencia: Los usuarios no tienen forma independiente de verificar la autenticidad de los datos.
- Escasa interoperabilidad: Cada proveedor suele utilizar formatos propietarios que dificultan la integración con terceros.
- Altos costos de infraestructura y mantenimiento: Se requiere personal, hardware y medidas redundantes para asegurar la disponibilidad del sistema.

A pesar de que ya ha habido esfuerzos por mantener la naturaleza descentralizada de la blockchain mediante su implementación en Sistemas de Información Distribuidos, estas propuestas suelen reducirse al volcado de documentos o cadenas de bloques, sin un preprocesado de la estructura y del almacenamiento de estos. Todo ello provoca principalmente un alto coste en gas, congestión en la red y escaso escalado en la blockchain. El modelo propuesto enlaza en una sinergia eficaz las siguientes tecnologías:

- LZ4, algoritmo de compresión sin pérdida y de alta velocidad, proporciona la compresión.
- IPFS nos deja utilizar un sistema de ficheros distribuido, en red descentralizada, redundante y repartido para el almacenamiento de ficheros.
- Blockchain garantiza la inmutabilidad y trazabilidad en el identificador del fichero.

La ventaja de esta combinación resuelve los principales cuellos de botella que limitan la adopción de blockchain en entornos big data, como el sector eléctrico. La factibilidad del sistema también permite su integración parcial con estructuras existentes, evitando costosas sustituciones o interrupciones operativas.

Al analizar el modelo propuesto desde distintos enfoques, obtenemos conclusiones relevantes. Económicamente, se presenta un porcentaje de ahorro significativo superior al 90% en los costos de almacenamiento y, además, se reduce en proporciones similares el consumo de gas. Operativamente, se destaca la disminución del trabajo computacional demandado y se acorta la latencia de respuesta. Y, considerando el ámbito de seguridad y confianza, el uso de estándares criptográficos y arquitecturas distribuidas convierte el sistema en una propuesta más resistente a manipulaciones y errores.

En resumen, al contrastar con modelos convencionales, el AMI-LZ4-IPFS-Blockchain-Energía no solo representa un abordaje innovador, sino que surge como una solución técnica, económica, legal y operativa eficaz, escalable e implementable de inmediato en escenarios reales.

El sistema AMI tradicional basa su funcionamiento en una arquitectura centralizada, donde la protección y gestión de los datos dependen de servidores específicos y controles de acceso tradicionales. Aunque emplea estándares de cifrado robustos como AES-128 y AES-256, su infraestructura es vulnerable a ataques cibernéticos y fallos de red, lo que puede comprometer la disponibilidad y la integridad de los datos. Además, el almacenamiento de información suele representar un costo elevado debido al mantenimiento de servidores y la redundancia requerida para evitar pérdidas.

Por otro lado, el modelo mejorado con IPFS, LZ4 y blockchain introduce un enfoque descentralizado que optimiza la seguridad, la disponibilidad y la eficiencia del almacenamiento de datos. Mediante el uso de IPFS (Interplanetary File System), los datos se distribuyen en una red de nodos, lo que garantiza mayor resiliencia frente a fallos y ataques Ddos (Denial of services). La compresión LZ4 permite reducir el tamaño de los archivos sin sacrificar velocidad, disminuyendo así los costos de almacenamiento y transmisión. La autenticación mediante JWT (JSON Web Tokens) refuerza la seguridad de acceso, mientras que la

integridad de los datos se asegura con hashes criptográficos en blockchain (sha-256), lo que evita manipulaciones indebidas y garantiza trazabilidad inmutable.

Si bien al implementar el modelo mejorado se incurre en costos de uso de la blockchain como el gas, la disminución del tamaño de los archivos y la eliminación de la costosa infraestructura centralizada generan ahorros suficientes. Por lo tanto, el nuevo modelo no solo mejora la integridad, disponibilidad y resiliencia de los datos, sino también la eficacia de la operación disminuyendo costos y riesgos de manipulación o pérdidas.

Este modelo representa una evolución significativa en la gestión de datos para sistemas AMI, adaptándose a las necesidades actuales de seguridad, escalabilidad y descentralización.

Aspecto	Sistema AMI Tradicional	Modelo Mejorado con IPFS, LZ4 y Blockchain
Estándares de Cifrado	AES-128 y AES-256 para cifrado en tránsito y en reposo.	LZ4 para compresión, JWT para autenticación, Blockchain para integridad.
Protección de Datos	Protección centralizada, depende de la seguridad del servidor y la red.	Protección descentralizada, verificación inmutable mediante blockchain.
Autenticidad de Datos	Basada en mecanismos de verificación internos, vulnerable a ataques.	Garantizada por JWT y registros inmutables en la blockchain.
Integridad de Datos	Controlada por registros de auditoría y controles de acceso, susceptible a alteraciones.	Garantizada por hashes criptográficos en blockchain (SHA-256).
Resiliencia	Dependiente de la redundancia del servidor y la red, puede fallar ante ataques DDoS.	Alta resiliencia mediante almacenamiento distribuido en IPFS y copias inmutables en blockchain.
Disponibilidad de Datos	Puede verse afectada por fallos en el servidor o la red.	Alta disponibilidad garantizada por la distribución entre nodos IPFS y la replicación en blockchain.
Costos de Almacenamiento	Altos debido a la infraestructura centralizada y mantenimiento de servidores.	Reducidos mediante compresión y almacenamiento distribuido en IPFS; los costos de gas en blockchain se compensan con el menor tamaño de los archivos.
Seguridad contra Manipulación	Vulnerable a manipulaciones internas y ataques si el servidor central es comprometido.	Protección robusta mediante la inmutabilidad de blockchain y verificación criptográfica.
Costos de Transacción y Gas	No aplicable, los costos están relacionados principalmente con la infraestructura centralizada.	Costos asociados al gas de blockchain; optimización significativa gracias a la reducción del tamaño de los archivos.

Tabla 6.4. Comparación de los modelos AMI generales vs El modelo propuesto.

6.5 Limitaciones del estudio

Este estudio ha logrado desarrollar un modelo para la gestión descentralizada de datos en sistemas de alumbrado público teledirigido, pero es esencial reconocer diversas limitaciones que afectan tanto al modelo propuesto como a la viabilidad de su implementación a gran escala.

1. Costos asociados a la tecnología Blockchain:

Los costes por comisiones Gas del blockchain, asociación en la red blockchain, plantean una serie de desafíos. Estas comisiones son los costes que los usuarios deben pagar para que se ejecuten sus transacciones, contratos inteligentes y otras operaciones en la cadena. Por ello, suponen un obstáculo importante para la implementación de esta propuesta a gran escala en el caso de estudio planteado. Esto es importante porque si bien existen, varían según la demanda de la cadena y la carga de cada transacción o contrato, y representan costes adicionales que podrían provocar tasas escandalosas en un entorno de operaciones de alta frecuencia. Este efecto económico podría suponer un capitalismo para la viabilidad económica en escenarios más complejos y en la adopción masiva de este modelo en proyectos de mayor escala, como es el caso de la red de alumbrado público en grandes ciudades o zonas metropolitanas. Es decir, las comisiones Gas deben ser un aspecto relevante a tener en consideración durante la planificación de la implementación de blockchain en una razonable economía circular (Sango Vásquez, 2024).

2. Limitaciones en la infraestructura existente:

Pese a que el modelo propuesto se basa en tecnologías del estado del arte como la de creación de redes peer-to-peer entre nodos IPFS, la compresión LZ4 y blockchain, el equipamiento de medida y control del sistema de alumbrado público que existe actualmente podría no estar en disposición de aceptar una infraestructura tecnológica tan compleja y cambiante. La convivencia de estos dispositivos con el nuevo modelo podría ser muy problemática y conflictos se podrían presentar debido a las diferencias en los protocolos, en las reglas de comunicación con los sistemas de control del usuario, en las vías de transmisión de datos y en su incapacidad de establecer comunicaciones continuas y sin interrupciones con el sistema propuesto. Todo ello haría muy difícil la aplicación del modelo de forma real.

3. Resistencia al cambio tecnológico por parte de CFE:

Uno de los principales factores de riesgo radica en la posible resistencia al cambio por parte de instituciones como la CFE, entidad encargada de la regulación y operación de los sistemas de alumbrado público en el país, que tendría que aceptar un nuevo modelo de operación como el presentado anteriormente. Para poder implementar un sistema de operación centralizada a una operacional descentralizada y sobre una red de blockchain pública, es esencial el proceso de transición y promoción de la importancia de la data confiable y su generación por medio de fuentes confiables. La resistencia puede estar en las instituciones tradicionales que supervisaban y departamentalizaban la operación. Ya que los costos de implementación que se propusieron u otros gastos operativos podrían no ser aceptados en la transición. Un modelo de operación descentralizado implica también una reestructuración de los sistemas de control e infraestructura de generación de data, que para ser adoptados necesitan de la aceptación y comprensión de todos los involucrados. Las instituciones que

operan mantienen sus sistemas de extracción de data y en el caso de la generación de la infraestructura de contratos inteligentes, la capacitación, entendimiento del manejo y la confianza necesaria para generar la data de forma confiable sin cambiar los medios físicos o ciberespacio escaso, con la suficiente cobertura en el tiempo como para perder la seguridad del proceso de generación no pueden ofrecerlo como garantía de validez. Suponiendo que el modelo fuera aceptado, la respuesta de compra-venta podría no ser lo suficientemente ágil como para registrar la data en tiempo real.

4. Complejidad de la gestión de usuarios y protocolos:

Además, su implementación implica una efectiva comunicación transversal, cooperativa e interrelacionada entre diversos grupos de interesados, tanto internos (operadores, técnicos) como externos (control, reguladores). Por lo tanto, la estructura y operatividad del modelo puede suponer un obstáculo mejor o peor dimensionado en el proceso de adecuación e implantación de una nueva infraestructura, especialmente si requiere la coordinación de intereses y la interrelación de protocolos de gestión.

5. Escalabilidad y rendimiento en condiciones variables:

Una línea interesante para futuros trabajos incluye la escalabilidad, ya que, aunque la solución fue validada de forma satisfactoria en términos de simulaciones, es necesario mejor validar el modelo en condiciones de red más complejas y en escenarios con una cantidad de datos mucho mayor para comprobar su rendimiento a medida que se escalan el número de dispositivos y el volumen de información soportados. Con el incremento en el número de dispositivos se ve incrementado el volumen de información generado; por este motivo, es importante analizar el rendimiento en cuanto a la carga de procesamiento del sistema, así como el impacto en la velocidad de transmisión de los paquetes, garantizando además la resistencia, tanto en la seguridad como en la integridad de la información enviada. Este aspecto es determinante para la viabilidad e implementación de la solución en un escenario escalable real.

En resumen, aunque se han alcanzado importantes avances y se ha demostrado la viabilidad del modelo en un entorno controlado, es necesario continuar investigando y superando estas limitaciones para que la solución sea completamente aplicable en escenarios de alumbrado público a gran escala. La adaptabilidad, escalabilidad e interoperabilidad del modelo serán elementos clave para su éxito a largo plazo, y su evaluación en condiciones reales es esencial para validar su efectividad en la práctica (Ávila Salvatierra, 2021).

Capítulo 7: Conclusiones y trabajos futuros

7.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación se diseñó y validó un modelo de gestión de datos descentralizado para sistemas de alumbrado público telemedido que contempló el uso de la tecnología IPFS, LZ4 y blockchain. Este modelo respondió al objetivo general planteado en la tesis, el cual consistió en optimizar la gestión del almacenamiento, transmisión y validación de los datos energéticos en sistemas de Infraestructura de Medición Avanzada (AMI).

Se desarrolló una propuesta computacional para la gestión descentralizada de la información de sistemas AMI, empleando como base la utilización de IPFS para el almacenamiento distribuido, LZ4 para la compresión de datos y blockchain para garantizar la integridad, trazabilidad y transparencia de los registros de consumo. Combinando estas tecnologías se logra el almacenamiento seguro y accesible de la información, la auditoría de la misma y una gestión transparente. En pruebas de funcionamiento con un conjunto de 3 lámparas reales en ambiente simulado, se valida la propuesta comprobando su capacidad de lograr una gestión eficiente y asegurar el funcionamiento óptimo, así como la reducción de costes y la optimización de recursos informáticos. Cabe mencionar que no se realizó en este trabajo una implementación a gran escala.

La implementación del prototipo funcional basado en tecnología blockchain y arquitectura ARM demostró satisfacer el objetivo general de la tesis en un entorno controlado. A través de la integración de interfaces IoT especializadas para AMI en el prototipo funcional construido, se logró simular un sistema de alumbrado público telemedido. Asimismo, se alcanzaron todos los objetivos específicos propuestos en la tesis, desarrollando una solución escalable para la gestión descentralizada de datos de alumbrado público, que sentará pautas para futuras implementaciones en sistemas reales.

A lo largo de esta investigación se expusieron los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos de validación relacionados con cada objetivo específico del diseño del sistema propuesto. En este sentido, se expone la respuesta a la hipótesis general de la investigación, la cual establece que un sistema de gestión, mejorado a través de un enfoque descentralizado, sería capaz de mejorar la eficiencia en el consumo energético mediante la optimización de la gestión de datos, reducción de costos operativos, disminución de la incidencia de pérdidas técnicas y no técnicas, aumentando la confiabilidad en la transmisión y validación de datos, y facilitando la auditoría, supervisión y control descentralizado a través de la seguridad e inmutabilidad que ofrece la tecnología Blockchain. En relación a la primera parte de la hipótesis, la implementación muestra que, efectivamente, al aplicar un sistema de gestión basado en el modelo de computación IPFS-LZ4-Blockchain para el almacenamiento y transmisión de datos en tiempo real, se logra una mejor eficiencia energética.

La hipótesis inicial propuesta fue validada con los resultados obtenidos. Consideramos que este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones y aplicaciones en el ámbito de la infraestructura de medición avanzada y la gestión energética inteligente.

Los resultados demostraron que las tres variaciones de la propuesta de compresión de datos mediante LZ4, encapsulación con JWT, almacenamiento en IPFS y registro en blockchain, presentaban una solución técnica no solo eficiente desde el punto de vista del espacio requerido o del costo de almacenamiento, sino que además poseen una robustez estructural que demuestra su validez en

aplicaciones prácticas del sector público, como es el caso de la gestión de alumbrado público, con entornos dinámicos y exigencias normativas complejas.

- Impacto en la transparencia y la auditoría pública

La innovación que ofrece este modelo radica en su capacidad de blindar el proceso de auditoría y de rendición de cuentas con IPFS CID inmutable. Al almacenar los datos en IPFS con generación de CIDs inmutables, se garantiza que ninguna de las partes: proveedor, consumidor y tercero, puede alterar ninguno de los datos, ni aumentando ni disminuyendo los consumos, generando mayores consumos o utilizando medidas de camuflaje. Lo que permite solventar el problema de confianza institucional. Al garantizar que, a la vez, se remiten y reciben datos con colecciones que mejoran exponencialmente la probabilidad estadística de que no existan datos por duplicados. Entonces, puede estar completamente seguro de que tanto el proveedor de servicios como el consumidor, acceden a la misma información en el mismo instante y se dispone de forma auditable de tal información.

- Aumento en la confiabilidad del sistema

A través de la implementación de módulos de validación automática, dicho sistema es capaz de detectar y excluir lecturas sospechosas (con un valor de cero, congeladas o con valores fuera de rango). Esto contribuye de forma notable a la calidad de los datos almacenados y minimiza el riesgo de errores facturadores o en el cálculo del consumo energético. La futura incorporación de algoritmos de IA que calculen un posible consumo a través de estimadores en el caso de mediciones erróneas –como se contempla en diversas líneas de investigación– podría ampliar esta capacidad de resiliencia.

- Reducción del riesgo de manipulación o pérdida de datos

Al no guardar ningún archivo en una base de datos centralizada, el modelo se queda sin un único punto de fallo. Es posible registrar en el blockchain eventos de al menos tres tipos: hash de la compresión, fecha de carga IPFS y cualquier otro evento clave. Se aprovecha el uso del blockchain debido a la imposibilidad de modificar lo registrado en una red global y el mecanismo criptográfico para garantizar la integridad.

7.2 Trabajos futuros

Partiendo de los resultados obtenidos y las limitaciones identificadas, se proponen las siguientes líneas de investigación que podrían enriquecer y ampliar el modelo presentado en esta tesis. Estas propuestas no solo consolidarían el enfoque descentralizado en la gestión de datos para sistemas de alumbrado público telemedido, sino que también permitirían abordar problemáticas recurrentes en entornos urbanos mediante el uso de tecnologías emergentes.

- Evaluación comparativa de algoritmos de compresión en entornos distribuidos

Aunque en este estudio se implementó el algoritmo LZ4 por su rapidez y bajo consumo de recursos, es relevante llevar a cabo una comparación sistemática con otros algoritmos, tales como Zstandard, Brotli, LZMA, Snappy o LZO. La finalidad es optimizar la replicación de datos y aumentar la eficiencia del sistema IPFS en contextos de alumbrado público inteligente. Esta evaluación debería contemplar el

rendimiento en condiciones reales, el impacto en dispositivos con bajo consumo de energía y el costo computacional asociado.

- Aplicación de blockchain para la detección y prevención de cortes indebidos de energía

Se considera crucial desarrollar mecanismos basados en blockchain que faciliten la detección, registro y prevención de cortes no autorizados en sistemas de alumbrado público. La implementación de blockchain permitiría la generación de registros inmutables de los eventos de desconexión, autenticando las órdenes de corte mediante contratos inteligentes y verificando su procedencia. Este enfoque mejoraría la trazabilidad y la gobernanza sobre los recursos energéticos públicos, reduciendo la manipulación indebida de los sistemas eléctricos.

- Inteligencia artificial para la estimación del consumo en ausencia de datos AMI

Ante la eventualidad de fallas en los dispositivos de medición avanzada (AMI) debido a desconexiones, interferencias o daños, resulta fundamental contar con sistemas de respaldo que estimen el consumo energético con alta precisión. La implementación de modelos de inteligencia artificial, como redes neuronales recurrentes o modelos de aprendizaje supervisado, permitiría generar estimaciones autónomas basadas en patrones históricos, datos climáticos y variables contextuales, asegurando la continuidad en el monitoreo y la facturación incluso en escenarios de fallos parciales.

- Integración de datos ambientales y contextuales para alumbrado adaptativo

Una extensión natural del modelo consiste en incorporar fuentes de datos externas, tales como sensores de movimiento, luminosidad, calidad del aire o presencia ciudadana, para activar mecanismos de alumbrado adaptativo. El uso combinado de inteligencia artificial y edge computing posibilitaría que cada nodo optimice su comportamiento de manera local, aumentando la eficiencia energética sin comprometer la seguridad urbana.

- Interoperabilidad entre plataformas IoT y estándares públicos

La consolidación de un sistema descentralizado requiere garantizar una alta interoperabilidad entre diversos dispositivos IoT y plataformas de gestión de alumbrado. La adopción de estándares abiertos, protocolos de comunicación seguros y herramientas de integración basadas en APIs o middleware resultará fundamental para escalar la solución a niveles nacionales o regionales.

7.3 Publicaciones

En esta sección se presentan las publicaciones y trabajos académicos derivados de la investigación, incluyendo artículos en revistas indexadas, congresos especializados y trabajos en proceso de publicación.

Publicación de artículos en JCR

- García-Reyes, R., Hernández-Aguilar, J. A., Ortiz-Hernández, J., Sánchez-Jiménez, E., Hernández-Pérez, M. Y., García-García, S. M., Mijarez-Castro, R., & Miguel-Ruiz, J. A. (2025). A Blockchain-Based Cybersecurity Model for Unauthorized Outage Prevention in AMI/SCADA Distribution Systems in México. *Programming and Computer Software*, 36(6), Artículo ID 100. Special Issue PCS24: Emerging Trends in Advanced Computing and Next-Generation Technologies. En proceso de publicación.
- García-Reyes, R., Ortiz-Hernández, J., Mijarez-Castro, R., Hernández-Aguilar, J. A., & Hernández-Pérez, M. Y. (2024). AMI/IoT Data Model for Public Lighting in Mexico Using LZ4 Compression, IPFS and Blockchain. *Programming and Computer Software*, 36(6), Artículo 10. Special Issue PCS24: Emerging Trends in Advanced Computing and Next-Generation Technologies. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36\(6\)-10](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36(6)-10)

Publicación de artículos en revistas indexadas y congresos internacionales

- García-Reyes, R., Ortiz-Hernández, J., Mijarez-Castro, R., Hernández-Aguilar, J. A., & Hernández-Pérez, M. Y. (2024). Implementation of Blockchain, IPFS and LZ4 in AMI Systems in the MEM to Improve Energy Balance and Electrical Management in Mexico. En 3rd Computer & Information Security: Methods and Applications (CISMA), IEEE Mexican International Conference on Computer Science (ENC 2024). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19320.35841>
- Hernández Aguilar, J. A., Hernández Pérez, Y., Ortiz-Hernández, J., García Reyes, R., Bonilla Sánchez, F., & Peralta-Abarca, J. del C. (2025). Intelligent student counting system tolerant to occlusions based on convolutional neural networks. En VII Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES 2024), Communications in Computer and Information Science (Vol. 2394, pp. 146–159). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-85324-1>

Publicación de artículos de congreso

- García-Reyes, R., Ortiz-Hernández, J., Hernández-Aguilar, J. A., Mijarez-Castro, R., & Hernández-Pérez, M. Y. (2025, mayo). *Post-Quantum Digital Signature Model for Blockchain using XMSS and Merkle Trees*. Presentado en Congreso CITCA 2024, CENIDET TECNM.
- García-Reyes, R. (2023, septiembre). Detección y corrección de datos intermitentes en sistemas de telemedición AMI de alumbrado público basados en blockchain. Presentado en CIMAT Guanajuato. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20998.08000>

Glosario

A

- Acuerdo digital: Es un tipo de contrato o convenio que se crea y formaliza completamente en un entorno electrónico. A menudo, estos acuerdos utilizan tecnologías como blockchain para asegurar su autenticidad y que no puedan ser alterados.
- Algoritmo de compresión: Se trata de un programa informático diseñado para reducir el tamaño de grandes volúmenes de datos de medición (metrología) de manera eficiente, sin perder información importante y manteniendo una alta velocidad de procesamiento.
- AMI (Advanced Metering Infrastructure - Infraestructura de Medición Avanzada): Es un sistema tecnológico avanzado que permite medir, recolectar y analizar datos sobre el consumo de energía en tiempo real. En el contexto del alumbrado público, el AMI facilita la supervisión en tiempo real y la telemedición de los dispositivos, lo que ayuda a gestionar el consumo de energía de forma precisa y a mejorar la visibilidad sobre cómo está funcionando el sistema.
- APBT (Alumbrado Público, Bajo Voltaje): Una de las clasificaciones tarifarias de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en México para el alumbrado público. Se aplica a clientes con un gran número de medidores o dispositivos conectados a internet (IoT/AMI) que operan con bajo voltaje.
- APMT (Alumbrado Público, Media Tensión): Similar a la APBT, esta es otra clasificación tarifaria de la CFE para el alumbrado público en México. Se refiere a clientes con un elevado número de medidores o dispositivos IoT/AMI que operan con media tensión.
- Arquitectura ARM: Es un diseño específico de procesadores muy utilizado en los sistemas AMI/IoT, especialmente en los desarrollados por el INEEL en México, para generar y procesar los archivos de datos de los medidores de consumo.

B

- BANOBRAS (Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos): Es un banco de desarrollo en México que ofrece financiamiento y asistencia técnica para proyectos de infraestructura pública. Se enfoca en áreas cruciales como el agua, el transporte y la energía, incluyendo iniciativas para modernizar el alumbrado público.
- Blockchain: Es una tecnología de registro digital compartido y descentralizado, a menudo descrita como un "libro mayor" o "base de datos" que no puede ser alterada (inmutable). Permite almacenar información de forma segura, transparente y distribuida a través de una red de computadoras. Esto significa que los datos son inmediatamente accesibles y visibles para los miembros autorizados, y una vez que una transacción se registra, no se puede cambiar.

C

- CFE (Comisión Federal de Electricidad): Es la empresa estatal encargada del suministro de energía eléctrica en México. Los consumidores le pagan por el consumo de energía para el alumbrado público, lo que a menudo representa un gasto considerable.
- CID (Content Identifier - Identificador de Contenido): Es un código único que el sistema IPFS genera para cada archivo. Este código permite encontrar y recuperar fácilmente el archivo desde cualquier punto de la red distribuida, sin importar dónde esté almacenado físicamente.
- CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía): Es un organismo gubernamental en México cuyo propósito principal es fomentar el uso responsable y eficiente de la energía en todos los sectores del país.
- Contratos combinados IoT: Son programas informáticos que se ejecutan automáticamente (contratos inteligentes) y están diseñados específicamente para gestionar dispositivos del Internet de las Cosas

(IoT). Permiten que estos dispositivos interactúen y realicen pagos de manera autónoma cuando se cumplen ciertas condiciones.

- Contratos inteligentes (Smart Contracts): Son programas que se almacenan y ejecutan directamente en una blockchain. Se activan y cumplen automáticamente una vez que se verifican condiciones específicas predefinidas, eliminando la necesidad de intermediarios y automatizando los acuerdos o la lógica de negocio.
- Criptomoneda: Es una forma de dinero digital que utiliza técnicas de cifrado (criptografía) para proteger y verificar sus transacciones. Generalmente funciona en una red descentralizada y ejemplos conocidos son el Bitcoin y Ethereum.

D

- DAO (Organizaciones Autónomas Descentralizadas): Son organizaciones que operan de forma independiente y se basan completamente en una blockchain. Sus reglas de funcionamiento y gobernanza están programadas directamente en contratos inteligentes, lo que elimina la necesidad de una autoridad central.
- DApps (Aplicaciones Distribuidas): Son aplicaciones de software que no dependen de un servidor central, sino que operan sobre una blockchain. Su naturaleza descentralizada las hace más seguras, transparentes y resistentes a fallos.
- D3A (Modelo de mercado de energía transactivo descentralizado y autónomo): Un concepto de mercado energético basado en blockchain que busca transformar el sistema eléctrico. Propone ir más allá de la red centralizada tradicional, integrando recursos de energía distribuidos (como paneles solares en casas) y fomentando la participación activa de los consumidores en la compra y venta de energía.
- Descentralización: Es un principio fundamental en sistemas tecnológicos donde el control y la toma de decisiones se distribuyen entre muchos participantes en lugar de depender de una única entidad central. Esto aumenta la robustez del sistema, haciéndolo más resistente a fallos o ciberataques.
- DIAT (Transmisión Industrial): Una clasificación tarifaria de electricidad de la CFE en México, que se aplica a clientes industriales con un medidor de consumo individual.
- DIST (Subtransmisión Industrial): Otra clasificación tarifaria de electricidad de la CFE en México, dirigida a clientes industriales con un medidor individual que reciben energía a niveles de subtransmisión.

E

- Eficiencia energética: Implica el uso óptimo de los recursos energéticos para lograr el mismo resultado (por ejemplo, iluminar una calle) con el menor consumo de energía posible. Es clave para encontrar soluciones más sostenibles en el alumbrado público.
- Energy Web Foundation (EWF): Una organización sin fines de lucro dedicada a acelerar la transición hacia un sistema energético más sostenible. Lo logran promoviendo el uso de blockchain y otras tecnologías descentralizadas en el sector energético.
- Ether: Es la criptomoneda nativa de la plataforma Ethereum. Se utiliza para pagar las tarifas (gas) necesarias para ejecutar transacciones y contratos inteligentes dentro de la red Ethereum.
- Ethereum: Una de las plataformas de blockchain más reconocidas, solo superada por Bitcoin. Permite a los desarrolladores crear contratos inteligentes y aplicaciones descentralizadas (DApps).
- EVM (Máquina Virtual de Ethereum): Es el entorno de ejecución dentro de la red Ethereum. La EVM es la responsable de procesar y validar todos los contratos inteligentes y transacciones, asegurando su correcto funcionamiento.

G

- Gas: En el contexto de Ethereum, "gas" es la unidad que mide la cantidad de esfuerzo computacional que requiere una operación, como enviar una transacción o ejecutar un contrato inteligente. Funciona como una tarifa que se paga a los "mineros" por el uso de la red.
- GDBT (Gran Demanda, Bajo Voltaje): Una clasificación tarifaria de electricidad de la CFE en México, destinada a clientes con una alta demanda de energía que reciben suministro en bajo voltaje y tienen un medidor individual.
- GDMTH (Gran Demanda Horaria, Media Tensión): Una clasificación tarifaria de electricidad de la CFE en México para clientes con una gran demanda de energía que se mide por bloques horarios y reciben suministro en media tensión, con un medidor individual.
- GDMTO (Gran Demanda Horaria, Media Tensión): Similar a GDMTH, es otra clasificación tarifaria de la CFE para clientes con alta demanda horaria y suministro en media tensión, con un medidor individual.
- I
- IoT (Internet de las Cosas): Se refiere a una vasta red de objetos físicos (como sensores de alumbrado, electrodomésticos, vehículos) que están equipados con tecnología para conectarse a internet y entre sí. Estos dispositivos pueden recopilar y compartir datos automáticamente.
- IPFS (InterPlanetary File System): Es un protocolo o sistema para almacenar archivos de forma distribuida. Permite que los archivos se guarden en una red de pares (peer-to-peer) y se identifiquen por su contenido único (CID), lo que facilita su acceso desde cualquier parte de la red. En el alumbrado público, es ideal para almacenar datos generados por sensores, permitiendo la descentralización sin comprometer la accesibilidad o seguridad.
- J
- JCR (Journal Citation Reports): Es una publicación anual que proporciona datos estadísticos para evaluar y comparar revistas académicas en los campos de la ciencia y las ciencias sociales. Incluye métricas importantes como el factor de impacto de una revista, que mide la frecuencia con la que los artículos de una revista han sido citados.
- JSON (JavaScript Object Notation): Es un formato simple y fácil de leer tanto para humanos como para máquinas, que se utiliza para organizar e intercambiar datos. Es comúnmente empleado en la capa AMI/IoT para estructurar los archivos de datos de los medidores.
- JWT (JSON Web Tokens): Son un método compacto y seguro para transmitir información entre partes como un objeto JSON. Se utilizan principalmente para la autenticación de usuarios y para reforzar la seguridad de acceso en sistemas informáticos.
- K
- kWh (kilovatio-hora): Es la unidad estándar para medir la energía eléctrica consumida. Un kWh representa la cantidad de energía que utiliza un dispositivo de 1,000 vatios (1 kilovatio) funcionando durante 1 hora.
- L
- LLL (Lisp de bajo nivel): Un lenguaje de programación diseñado para escribir contratos inteligentes directamente en la Máquina Virtual de Ethereum (EVM). Aunque es potente, su uso es considerado muy complejo para la mayoría de los desarrolladores.
- LoRa (Long Range): Un protocolo de comunicación inalámbrica diseñado para transmisiones de largo alcance y bajo consumo de energía. Es muy adecuado para aplicaciones de ciudades inteligentes, ya que permite una comunicación eficiente y segura tanto en interiores como en exteriores.
- LZ4: Otro algoritmo de compresión sin pérdida, basado en un método de diccionario. Es conocido por su extrema velocidad y eficiencia, lo que lo hace ideal para reducir el tamaño de grandes volúmenes de datos sin perder información, algo esencial en sistemas que generan muchos datos.

- LZ77: Es un algoritmo de compresión de datos que opera buscando y reemplazando secuencias de caracteres repetidas dentro de un archivo con referencias a sus ocurrencias anteriores, lo que ayuda a reducir el tamaño del archivo.
 - LZO (Lempel-Ziv-Oberhumer): Un tipo de algoritmo de compresión que no pierde datos (sin pérdida) y está optimizado específicamente para una descompresión muy rápida de la información.
- M
- Microrredes: En el sector eléctrico, las microrredes son pequeños sistemas de generación y distribución de energía que operan de forma independiente o conectados a la red principal. Ayudan a suplir las necesidades de energía en áreas específicas y la tecnología blockchain ha mejorado significativamente la forma en que se comercializa la energía dentro de ellas, haciéndolo más económico, seguro y descentralizado.
 - Mineros: Son los participantes en una red blockchain (como Bitcoin o Ethereum) que utilizan la capacidad de procesamiento de sus computadoras para verificar y validar las transacciones. Al hacerlo, agrupan estas transacciones en nuevos "bloques" y los añaden a la cadena, siendo recompensados por su trabajo.
- N
- NOM (Norma Oficial Mexicana): Son regulaciones técnicas de cumplimiento obligatorio en México. Establecen especificaciones, métodos, directrices y características que deben cumplir productos, procesos, instalaciones, sistemas o servicios en áreas como seguridad, salud, medio ambiente y tecnología.
- P
- PDBT (Pequeña Demanda, Bajo Voltaje): Una clasificación tarifaria de electricidad de la CFE en México, dirigida a clientes con una baja demanda de energía que reciben suministro en bajo voltaje y tienen un medidor individual.
 - PLC (Power Line Communication - Comunicación por Línea Eléctrica): Es una tecnología que permite transmitir datos y comunicaciones utilizando las mismas líneas de cableado eléctrico ya existentes. En lugar de instalar cables de comunicación adicionales, PLC aprovecha las redes eléctricas para enviar señales digitales de datos a través de las mismas líneas que transportan la electricidad. Esto se usa, por ejemplo, en sistemas de automatización del hogar, monitoreo de energía y redes de comunicación en entornos industriales, facilitando la transmisión de información sin necesidad de infraestructura adicional.
 - PoA (Proof of Authority - Prueba de Autoridad): Un método de consenso utilizado en algunas redes blockchain. En lugar de que todos los participantes validen transacciones, un número limitado de nodos preseleccionados y de confianza (llamados "autoridades") son los encargados de este proceso. Esto lo hace más rápido y menos intensivo en recursos que otros métodos como Proof of Work.
 - PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses): Es una guía o metodología estándar utilizada en la investigación académica para llevar a cabo revisiones sistemáticas y meta-análisis de literatura. Se adapta para identificar de manera rigurosa las publicaciones más relevantes sobre temas específicos, como la descentralización de datos en sistemas de alumbrado público.
 - Proyecto Nacional de Eficiencia Energética en Alumbrado Público Municipal: Una iniciativa lanzada por el gobierno federal de México en 2010. Fue impulsado por la SENER, CONUEE y BANOBRAS con el objetivo de fomentar la mejora y el uso eficiente de la energía en los sistemas de alumbrado público de los consumidores.

- Prosumidores: Son usuarios que no solo consumen energía, sino que también la producen (por ejemplo, con paneles solares en sus hogares). Tienen la capacidad de vender el excedente de energía que generan a otros consumidores, a la empresa de servicios eléctricos o directamente a la red.

R

- RAMT (Riego Agrícola, Media Tensión): Una clasificación tarifaria de electricidad de la CFE en México, específicamente para clientes del sector agrícola que utilizan riego, reciben suministro en media tensión y tienen un medidor individual.
- RABT (Riego Agrícola, Bajo Voltaje): Similar a RAMT, pero esta clasificación tarifaria de la CFE es para clientes agrícolas de riego que reciben suministro en bajo voltaje y tienen un medidor individual.
- Redes de blockchain autorizadas (o privadas con permiso): Son redes blockchain donde existen restricciones sobre quién puede unirse y qué transacciones puede realizar. Generalmente, se requiere una invitación o permiso expreso para participar. Son comunes en entornos empresariales donde se busca un control sobre los participantes.
- Redes privadas de blockchain: Son redes peer-to-peer (P2P) descentralizadas que están controladas por una única organización. Esta organización decide quién puede participar, quién puede ejecutar el protocolo de consenso y quién mantiene el registro compartido (libro mayor).
- Redes públicas de blockchain: Son redes blockchain a las que cualquier persona puede unirse y participar libremente, como Bitcoin. Aunque ofrecen máxima descentralización, pueden tener desafíos como altos requisitos de cómputo, menor privacidad y, en ciertos contextos empresariales, seguridad más débil en comparación con las redes autorizadas.

S

- SENER (Secretaría de Energía): Es la institución del gobierno de México responsable de establecer y gestionar la política energética del país. Sus funciones incluyen promover el uso eficiente y sostenible de los recursos energéticos.
- Serpent (basado en Python): Un lenguaje de programación que se utilizó históricamente para escribir contratos inteligentes en blockchain, inspirado en Python. Sin embargo, su uso ha disminuido en comparación con lenguajes más modernos como Solidity.
- SETM (Secure Energy Trading Model - Modelo de Comercio de Energía Seguro): Es un marco o sistema que utiliza la tecnología blockchain para gestionar y controlar aspectos como el consumo y la producción de energía eléctrica en un entorno de comercio seguro. Opera a través de un "agente de multi interacción" que facilita las transacciones.
- SHA-256: Es un algoritmo de hash criptográfico. Su función es transformar cualquier dato, sin importar su tamaño, en una cadena de 256 bits de longitud fija. Se usa para verificar la integridad de los datos, garantizando que no han sido alterados (por ejemplo, en criptomonedas).
- SICOM (Sistema de Información y Comunicación para la Gestión de Obras y Proyectos): Es un sistema que facilita la gestión y el seguimiento de proyectos de infraestructura pública en México.
- Smart Grid (Red Eléctrica Inteligente): Se refiere a una modernización de la red de distribución eléctrica tradicional. Incorpora tecnologías avanzadas de comunicación, sensores y automatización para optimizar la eficiencia, mejorar la fiabilidad del suministro y hacer el sistema eléctrico más sostenible.
- Solidity: Es el lenguaje de programación predominante y recomendado para crear contratos inteligentes en la plataforma Ethereum y otras blockchain compatibles con la EVM.
- solc-js: Es una librería escrita en JavaScript que permite a los desarrolladores compilar el código de los contratos inteligentes escritos en Solidity. Una vez compilados, estos contratos pueden ser desplegados y ejecutados en la blockchain de Ethereum.

T

- Telemedición (Tele gestión): Es la capacidad de medir, recolectar y transmitir datos en tiempo real sobre el consumo de energía, la detección de fallos o las condiciones operativas de un sistema, como el alumbrado público. Permite una gestión remota y precisa.
- Texto plano: Es un formato de archivo muy básico que contiene únicamente caracteres de texto. No incluye ningún tipo de formato especial como negritas, cursivas, diferentes fuentes o imágenes, lo que lo hace universalmente compatible.
- Transacciones peer-to-peer (P2P): Facilitadas por la tecnología blockchain, son intercambios directos de energía (o de cualquier otro activo) entre dos partes, como prosumidores y consumidores, sin la necesidad de un intermediario central como una empresa de servicios públicos.

V

- VANET (Redes Vehiculares Ad-Hoc): Son redes de comunicación inalámbrica que permiten a los vehículos comunicarse entre sí y con la infraestructura vial. Pueden usarse para detectar la presencia, ubicación, dirección y velocidad de los vehículos en tiempo real, lo que permite controlar y ajustar automáticamente la iluminación de las calles para ahorrar energía.
- Viper (basado en Python): Un lenguaje de programación para crear contratos inteligentes en blockchain, similar a Solidity pero con una sintaxis inspirada en Python. Está diseñado para priorizar la seguridad y la eficiencia en la ejecución de los contratos.

X

- XML (Extensible Markup Language): Es un formato de lenguaje utilizado para estructurar y transportar datos de manera organizada. Es versátil y se emplea para definir un conjunto de reglas para codificar documentos de una forma que sea legible tanto para humanos como para máquinas.

Z

- Zstandard: Es un algoritmo de compresión sin pérdida muy rápido. Se menciona a menudo en contextos de investigación como una opción prometedora para futuras evaluaciones comparativas de rendimiento en la compactación de datos.

Referencias

Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, 143–174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>

Ávila Salvatierra, V. L. (2021). Análisis de controladores lógicos programables para circuitos de iluminación LED con ahorro energético [Tesis de pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí]. <https://unesum.edu.ec/>

Benet, J. (2014). IPFS – Content addressed, versioned, P2P file system. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1407.3561>

Blanco Rico, A. (2021). Diseño de un sistema descentralizado de gestión energética para alumbrado público [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Valencia].

Blanco Rico, G. (2021). Sistema de teled medida y sensorización mediante red LoRaWAN [Tesis de pregrado, Universidad de Valladolid]. <https://www.uva.es/>

Bronski, P., Creyts, J., Gao, S., Hambridge, S., Hartnett, S., Hesse, E., Morris, J., Nanavatty, R., & Pennington, N. (2018). The Decentralized Autonomous Area Agent (D3A) market model: An implementation framework for transactive energy based on blockchain for the 21st century grid. Energy Web Foundation. <https://energyweb.org/D3A>

Buterin, V. (2014). Ethereum white paper: A next-generation smart contract and decentralized application platform. <https://ethereum.org/en/whitepaper/>

Cabrera Rojas, A. R., & Condori, L. (2024). Diseño de un sistema de supervisión de alumbrado público, basado en los modelos de ciudad inteligente e internet de las cosas para la ciudad de Sicuani [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <https://www.unsaac.edu.pe/>

Charne, J. G. (2021). Estrategias de optimización y análisis de performance en sistemas de almacenamiento distribuido [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de La Plata]. <https://unlp.edu.ar/>

Choobineh, M., Paaso, A., Arabnya, A., Sohrabi, B., & Khodaei, A. (2023). Blockchain technology in energy systems: A state-of-the-art review. *IET Blockchain*, 3(1), 35–59. <https://doi.org/10.1049/blc2.12020>

Collet, Y. (2013). LZ4 – Extremely fast compression. <https://github.com/lz4/lz4>

Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2025). CFE: Esquema tarifario vigente.
<https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Negocio.aspx>

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2015, junio 15). Estados y municipios: Proyecto nacional de eficiencia energética en alumbrado público municipal.
<https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/estados-y-municipios-proyecto-nacional-de-eficiencia-energetica-en-alumbrado-publico-municipal>

Contreras del Valle, F. A. (2020). Blockchain en el sector energético mexicano: Impulsando la transformación digital. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
<https://www.energypartnership.mx/>

Dehghani, M. (2020). Blockchain-based securing of data exchange in a power transmission system considering congestion management and social welfare. *Energy Reports*, 6, 1065–1074.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.006>

Diario Oficial de la Federación. (2017, marzo 1). Acuerdo que abroga el diverso por el que se determina el concepto de demanda y los requisitos para la agregación de centros de carga.
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5474979&fecha=01/03/2017

Elsagheer Mohamed, S. A. (2013). Smart street lighting control and monitoring system for electrical power saving by using VANET [Manuscrito no publicado]. College of Computer, Qassim University; Electrical Engineering Department, Asswan University.

Enríquez Enríquez, C. A. (2024). Sistemas de medición remota de energía eléctrica en la agencia Nabón CENTROSUR: Factibilidad y beneficios analizados [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Cuenca]. <https://www.ucacue.edu.ec/>

Enríquez Enríquez, L. (2024). Evaluación de plataformas para la gestión inteligente de alumbrado público en México [Informe técnico, Instituto Nacional de Energía y Ambiente].

Ferreira, J. C. (2018). Building a community of users for open market energy. *Energy Policy*, 116, 301–310. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.02.033>

Galici, M. (2021). Energy blockchain for public energy communities.

Galván Torres, D. R. (2021). Prototipo de una aplicación descentralizada de apoyo a los procedimientos de gestión de inventarios de la Universidad Distrital usando Blockchain e IPFS [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].
<https://repository.udistrital.edu.co/items/db645dd2-b536-4c9d-b70a-7ecdffc358fe>

García Jacobs, M. D. (2023). Diseño de investigación de una propuesta de modelo para el cobro de la tasa municipal de alumbrado público, con base en el consumo de energía, en Salcajá [Tesis de maestría inédita, Universidad de San Carlos de Guatemala].

Hernández Rivera, G. F. (2021). Blockchain e IPFS para intercambiar información de bacterias resistentes a los antibióticos [Tesis de maestría inédita, Instituto Tecnológico Autónomo de México].

Hernández Rivera, G. F. (2021). Tecnologías emergentes para el almacenamiento y seguridad de datos en IoT. *Revista Iberoamericana de Tecnologías del Conocimiento*, 17(3), 45–62.

IBM. (2025). What is blockchain? <https://www.ibm.com/topics/what-is-blockchain>

Janiga, P., & Gašparovský, D. (2012). Measuring and evaluating energy consumption in street lighting networks. En 11th International Conference, Institute of Power and Applied Electrical Engineering, FEI STU Bratislava.

Kim, S.-K. (2018). A study on the improvement of smart grid security performance and blockchain smart grid perspective. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 13(3), 965–973. <https://doi.org/10.5370/JEET.2018.13.3.965>

Ko, H., & Praça, I. (2021). Design of a secure energy trading model based on a blockchain. *Sustainability*, 13(3), 1634. <https://doi.org/10.3390/su13031634>

Korkmaz, A., Kılıç, E., Türkay, M., Çakmak, Ö. F., Arslan, T. Y., & Erdoğan, U. (2021). A blockchain-based P2P energy trading solution for smart grids. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30192.58882>

Landázuri Sánchez, F. (2023). Redes jerárquicas y protocolos de control para sistemas de alumbrado público inteligentes. *Revista de Ingeniería y Sociedad*, 12(1), 77–90.

Landázuri Sánchez, J. J. (2023). Estudio de factibilidad para la implementación de una solución tecnológica de ahorro energético de los sistemas de iluminación para el edificio de departamentos [Tesis de pregrado, Universidad de Las Américas]. <https://www.udla.edu.ec/>

LED Point. (2020). Importancia de la iluminación eficiente en alumbrado público [Entrada de blog]. <https://www.ledpoint.com.mx/post/importancia-de-la-iluminaci%C3%B3n-eficiente-en-alumbrado-p%C3%BAblico>

LZ4. (2025). LZ4 block format description. <https://lz4.org/>

Masso, M. (2019). Study and implementation of blockchain compression [Tesis de licenciatura, University of Padua, Department of Information Engineering].

Mattila, J., & Seppälä, T. (2017). A blockchain application in energy. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/316635686>

Meeuw, A., Schopfer, S., & Wortmann, F. (2019). Experimental bandwidth benchmarking for P2P markets in blockchain managed microgrids. *Energy Procedia*, 159, 370–375. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.073>

Messina, D., Contreras Lisperguer, R., & Salgado, R. (2022). Tendencias en materia de digitalización del sector eléctrico. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>

Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., & Goldfeder, S. (2016). Bitcoin and cryptocurrency technologies. Princeton University Press.

Oadowicz, A., & Grela, J. (2016). Energy saving in the street lighting control system—a new approach based on the EN-15232 standard. *Energy Efficiency*, 9(4), 1105–1121. <https://doi.org/10.1007/s12053-016-9402-6>

Okoye, M. O., Yang, J., Cui, J., Lei, Z., Yuan, J., Wang, H., Ji, H., Feng, J., & Ezech, C. (2017). A blockchain-enhanced transaction model for microgrid energy trading. *IEEE Access*.

Padrón Hernández, S. (2015). Inteligencia artificial en la operación de redes eléctricas: Aplicación a sistemas aislados [Tesis doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Instituto Universitario SIANI].

Rousseau, P. (2020). La reforma energética (2013–2014) a la luz de la nueva legislación sobre los impactos sociales de los proyectos. *Foro Internacional*, 60(2), 853–887. <https://doi.org/10.24201/fi.v60i2.2740>

Sánchez Sutil, F., & Cano-Ortega, A. (2020). Smart public lighting control and measurement system using LoRa network [Informe técnico, Universidad de Jaén, Departamento de Ingeniería Eléctrica].

Sango Vásquez, J. P. (2024). Estudio de las tecnologías blockchain y sus aplicaciones en redes celulares 5G, 6G y en seguridades: Estudio de la tecnología blockchain y su aplicación [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. <https://epn.edu.ec/>

Secretaría de Energía. (2016). Avanza el proceso de separación de la CFE y su grupo corporativo. <https://www.gob.mx/sener/prensa/avanza-el-proceso-de-separacion-de-la-cfe-y-su-grupo-corporativo>

Sistema de Información Energética. (2020). El Sistema de Información Energética. Secretaría de Energía. <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions>

Suhendri, S., & Suryana, A. (2023). Blockchain application for public street lighting in data sensor. *International Journal of Application on Sciences, Technology and Engineering (IJASTE)*, 1(2), 651–655. <https://doi.org/10.24912/ijaste.v1.i2.651-655>

Swain, A. (2021). An optimized and decentralized energy provision system for smart cities. *Energy Reports*, 7, 4592–4602. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.129>

Wang, J. (2017). A novel electricity transaction mode of microgrids based on blockchain and continuous double auction. En Proceedings of the 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274159>

Zareen, H., Awan, S., Sajid, M. B. E., Baig, S. M., Faisal, M., & Javaid, N. (2021). Blockchain and IPFS based service model for the Internet of Things [Manuscrito no publicado]. Department of Computer Science, COMSATS University Islamabad.

Zhang, X., Xu, Q., Lu, J., & Xu, J. (2021). Conceptual characteristics and analysis of typical application scenarios of energy blockchain. Journal of Physics: Conference Series, 1738(1), 012113. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1738/1/012113>

Zhou, Y. (2020). Discussion on the application of energy microgrid integrated with blockchain technology. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 558(5), 052024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/558/5/052024>