



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**OPORTUNIDADES DE APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA
BLOCKCHAIN EN MICRO-REDES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

FEDOR IVÁN CAMBIAZO ALVEAR

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO ANDRÉS MENDOZA ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CESAR AZURDIA MEZA
RODRIGO PALMA BEHNKE

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA
POR: **FEDOR IVÁN CAMBIAZO ALVEAR**
FECHA: 2021
PROF. GUÍA: PATRICIO ANDRÉS MENDOZA ARAYA

OPORTUNIDADES DE APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN EN MICRO-REDES

La investigación en torno a la implementación de plataformas descentralizadas fundamentadas en los avances científicos de las Tecnologías de Registro Distribuido (DLT) durante los últimos años, se ha convertido en un tópico de interés para el desarrollo de diversas aplicaciones distribuidas en un segmento importante de sectores industriales que actualmente operan por medio de arquitecturas de red centralizadas. En función de esto último, la tecnología *blockchain* representa un cambio de paradigma para los sistemas de comunicación tradicionales, englobando múltiples interacciones descentralizadas entre nodos de un sistema, por medio de una estructura de datos basada en mecanismos de criptografía avanzada y algoritmos de consenso entre participantes.

El diseño y la implementación de aplicaciones distribuidas dirigidas al sector eléctrico, por medio de la tecnología *blockchain*, permite complementar el proceso de descentralización, digitalización y descarbonización de la matriz energética actual, habilitando el desarrollo de esquemas modernos de redes eléctricas que permitan integrar recursos energéticos distribuidos, algoritmos participativos, y sistemas de gestión energética asociados a comunidades inteligentes para incorporar una mayor flexibilidad, seguridad y calidad de suministro en los sistemas eléctricos de potencia de los próximos años.

De esta forma, el presente trabajo de título realiza una exploración de las oportunidades de aplicación de la tecnología *blockchain* en el ámbito de las micro-redes y la generación distribuida, detallando el estado del arte de los principales tópicos de investigación de estos sistemas, como lo son los mercados locales de energía, la optimización de los recursos energéticos distribuidos, las aplicaciones que relacionan estaciones de carga comunitarias y vehículos eléctricos, y los esquemas distribuidos de gestión de la demanda, desplegando y analizando dos aplicaciones de la tecnología *blockchain* en un modelo computacional de micro-red de estudio.

En este sentido, el proyecto asociado a esta memoria de título detalla el diseño y la implementación computacional de un entorno operativo de mercado local de energía habilitado por la tecnología *blockchain*, simulando la interacción *peer-to-peer* entre diversos tipos de agentes *prosumidores* que participan en la micro-red de estudio. Además, se despliega en la red *blockchain* una segunda aplicación distribuida, con el objetivo de ejecutar un esquema descentralizado de gestión de la demanda, permitiendo reducir el *peak* de consumos agregados del sistema mediante un juego no cooperativo entre los participantes del modelo de estudio.

A mi familia.

Agradecimientos

Quisiera comenzar este trabajo agradeciendo profundamente a mi familia, a mi madre Rosa, a mi hermana Constanza y a mi abuela Gladys, quienes me han acompañado día a día durante este proceso. Agradezco el apoyo incondicional y el cariño inconmensurable que me han brindado durante mi vida académica. Agradezco su felicidad al compartir esas pequeñas victorias de la etapa universitaria conmigo, como también sus gestos y palabras de aliento en aquellos momentos de la carrera que los ameritaban. Haber alcanzado esta instancia final de la carrera se lo debo fundamentalmente a ellas.

También agradezco a mis amigos, aquellos con los cuales he pasado estos años de aprendizaje, con quienes hemos compartido vivencias y experiencias en lo cotidiano, en la risa y en el silencio, en conversaciones interminables y en el rigor del estudio. Agradezco la oportunidad que he tenido de aprender de ellos y con ellos, enfrentando cada desafío y celebrando cada logro, compartiendo nuestros objetivos y trabajando en conjunto para cumplir nuestras metas.

Además, quiero agradecer al profesor Patricio Mendoza por aceptar ser guía de la presente memoria de título, entregando sus consejos, su paciencia y su orientación en el desarrollo de esta investigación. Agradezco su buena disposición como docente y su seguimiento constante de este trabajo durante el periodo de un año de desarrollo.

Finalmente, quiero agradecer al proyecto ANID/FONDAP/15110019 por el apoyo que ha entregado en la realización de esta memoria de título.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación y Antecedentes	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivos generales	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Alcances	4
1.4. Estructura de la Memoria	4
2. Marco Teórico y Estado del Arte	5
2.1. Marco Teórico	5
2.1.1. Micro-redes	5
2.1.1.1. Tipos de micro-redes	6
2.1.1.2. Componentes del sistema	7
2.1.2. Blockchain	11
2.1.2.1. Estructura de datos	11
2.1.2.2. Algoritmos de consenso	14
2.1.2.3. Modelos de permiso	17
2.1.2.4. Atributos de la tecnología	19
2.2. Estado del Arte	20
2.2.1. Mercados Locales de Energía	21
2.2.2. Protocolos de Gestión de la Demanda	23
2.2.3. Aplicaciones en Electromovilidad	24
2.2.4. Optimización de Recursos Energéticos Distribuidos	25
3. Metodología	27
3.1. Modelo de la micro-red	28
3.1.1. Topología del sistema	28
3.1.2. Parámetros del modelo	29
3.1.3. Perfiles de demanda	30
3.1.4. Perfiles de generación	32
3.2. Algoritmos distribuidos	33
3.2.1. Sistema de Gestión de la Demanda	34
3.2.2. Mercado Local de Energía	40
3.3. Entorno de desarrollo	43
4. Resultados y Discusión	44
4.1. Sistema de Gestión de la Demanda	46
4.1.1. Costos operativos	46

4.1.2.	Desplazamientos de carga	47
4.1.3.	Rendimiento del sistema	52
4.2.	Mercado Local de Energía	53
4.2.1.	Costos operativos	53
4.2.2.	Operación del sistema	54
4.3.	Simulación Combinada	58
5.	Conclusiones y Trabajo Futuro	60
5.1.	Conclusiones	60
5.1.1.	Sistema de Gestión de la Demanda	60
5.1.2.	Mercado Local de Energía	61
5.2.	Trabajo Futuro	61
	Glosario	62
	Siglas	63
	Bibliografía	64
	Anexo A. Direcciones de cuenta	68
	Anexo B. Despliegue de contratos	69
	Anexo C. Mercado P2P	70

Índice de Tablas

2.1.	Diferencias entre la tecnología <i>blockchain</i> y las bases de datos compartidas. . .	19
3.1.	Grupo 1 - Parámetros Técnicos.	29
3.2.	Grupo 2 - Parámetros Técnicos.	29
3.3.	Grupo 3 - Parámetros Técnicos.	30
3.4.	Grupo 4 - Parámetros Técnicos.	30
3.5.	Parámetros de las cargas desplazables del sistema.	31
3.6.	Parámetros de las cargas no desplazables del sistema.	32
3.7.	Algoritmos distribuidos del sistema de gestión de la demanda.	38
3.8.	Estructura funcional del <i>smart contract</i> DSM.	39
3.9.	Estructura funcional del <i>smart contract</i> LEM.	42
4.1.	Parámetros de las aplicaciones descentralizadas de la micro-red.	45
4.2.	Costos operativos del sistema de gestión de la demanda.	46
4.3.	Costos operativos del mercado local de energía.	53
4.4.	Precio promedio semanal de la energía en el mercado.	57
4.5.	Volúmenes de energía, simulación combinada.	59

Índice de Ilustraciones

2.1.	Esquema operativo de un sistema de gestión de energía (EMS).	9
2.2.	Esquema simplificado de registro en <i>blockchain</i>	11
2.3.	Aplicación de función <i>hash</i> criptográfica <i>SHA-3</i>	12
2.4.	Diagrama funcional de la estructura de datos <i>árbol de Merkle</i>	13
2.5.	Esquema operativo del algoritmo <i>Proof of Work</i>	15
2.6.	Modelos de permiso de sistemas <i>blockchain</i>	18
3.1.	Configuración topológica de la micro-red de estudio [45].	28
3.2.	Perfil promedio de demanda semanal.	31
3.3.	Curvas de generación agregada.	32
3.4.	Línea temporal de operación de las aplicaciones distribuidas.	33
3.5.	Esquema de operación del protocolo de gestión de la demanda.	39
3.6.	Esquema operativo de la micro-red.	40
3.7.	Esquema operativo del sistema de gestión de la energía residencial	41
3.8.	Diagrama operativo del entorno de desarrollo <i>Hardhat</i>	43
4.1.	Resultados del sistema de gestión de la demanda.	47
4.2.	Desplazamientos de carga – Grupo 1.	48
4.3.	Desplazamientos de carga – Grupo 2.	49
4.4.	Desplazamientos de carga – Grupo 3.	50
4.5.	Desplazamientos de carga – Grupo 4.	50
4.6.	Perfil de ahorro, sistema de gestión de la demanda.	51
4.7.	Evolución de la razón <i>peak-promedio</i> del sistema.	52
4.8.	Perfil de operación semanal del mercado local de energía.	54
4.9.	Volumen de energía promedio horario, simulación semanal.	55
4.10.	Transacciones de energía promedio horario, simulación semanal.	55
4.11.	Perfil de interacción promedio con el mecanismo de mercado.	56
4.12.	Perfil de precios de despeje de la doble subasta.	56
4.13.	Volúmenes de energía trazados por la plataforma <i>blockchain</i>	57
4.14.	Operación del mercado local de energía en los escenarios base y con gestión de la demanda.	58
4.15.	Número de transacciones horarias entre agentes del sistema.	59

Capítulo 1

Introducción

El presente capítulo describe la motivación y los antecedentes que engloban la investigación y el desarrollo del trabajo de título, detallando los objetivos generales y específicos de la memoria, junto a la estructura formal que contempla el documento.

1.1. Motivación y Antecedentes

En la actualidad, los esquemas tradicionales de operación y comunicación de redes eléctricas se enfrentan con múltiples desafíos técnicos en función de los crecientes niveles de penetración de energías renovables no convencionales en los sistemas eléctricos de potencia y de las necesidades físicas de suministro previstas para las próximas décadas, relativas al incremento sostenido de la demanda sistémica del recurso. Estos desafíos motivan el desarrollo e integración de protocolos modernos de comunicación capaces de habilitar un mayor grado de participación, flexibilidad y seguridad en la operación dinámica de estos sistemas, incorporando potenciales agentes y servicios complementarios en los diversos segmentos que componen el sector eléctrico [1].

En el contexto nacional, los resultados asociados al “Informe de Previsión de Demanda 2020 – 2040” emitidos por la Comisión Nacional de Energía (CNE) estiman un crecimiento del consumo eléctrico equivalente a un 60 %, con una tasa promedio anual de incremento del 2.38 % para clientes libres y regulados conectados al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), proyectando una demanda sistémica de 113.5 [TWh] al final del periodo. Así mismo, la información que adjunta dicho informe estima un crecimiento de la generación residencial de un 21 % a nivel de subestación primaria en el periodo, proyectando un nivel de generación residencial de 1.24 [TWh] para el año 2040 [2]. Este escenario de crecimiento sostenido de la demanda eléctrica involucra un aumento en el estrés operacional del sistema, el cual está sujeto a las capacidades de flexibilidad del suministro y de respuesta a la demanda que actualmente presentan los modelos tradicionales de redes eléctricas. En este sentido, las tecnologías de información que permitan integrar la generación residencial y la aplicación de estrategias de gestión de la demanda, asociadas a comunidades inteligentes y mercados locales de energía, cumplirán un rol fundamental en el diseño y la planificación de las redes eléctricas inteligentes durante los próximos años [3].

El desarrollo tecnológico de los sistemas de medición y control de redes eléctricas, además de la disminución en los costos de inversión en equipamientos asociados con la generación residencial y los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, han propiciado el desarrollo de proyectos de generación distribuida para suplir localmente las necesidades de suministro de los consumidores, introduciendo la figura del *prosumidor* en el segmento de distribución eléctrica, el cual corresponde a un agente con la capacidad de autoabastecer sus consumos eléctricos locales y vender sus excedentes de energía a la red de distribución o a otros usuarios del sistema en transacciones *peer-to-peer* (P2P) [4]. La incorporación de este rol activo en el segmento de la demanda supone un cambio de paradigma para la operación de los sistemas eléctricos actuales basados en flujos unidireccionales de energía, incentivando la participación de agentes *prosumidores* en transacciones de energía y esquemas de gestión de recursos energéticos distribuidos desplegados en comunidades inteligentes del sistema [5].

En función de este cambio de paradigma en los esquemas operacionales de las redes de distribución actuales, los modelos centralizados tradicionales requerirían el desarrollo de complejas infraestructuras de comunicación para permitir la aplicación de protocolos comunitarios de coordinación de consumos y múltiples transacciones de energía entre *prosumidores* del sistema [6]. Esto último favorece la aplicación de metodologías descentralizadas de comunicación y registros de información, como lo son las “*Distributed Ledger Technology*” (“Tecnologías de Libro Mayor Distribuido”), entre las cuales la tecnología “*Blockchain*” (“Cadena de Bloques”) ha percibido un rápido desarrollo desde su conceptualización en el paper “*Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*”, publicado por Satoshi Nakamoto en el año 2009 [7].

Posterior a su conceptualización, la tecnología *blockchain* ha comenzado a ser adoptada por diversos sectores industriales, desarrollando múltiples aplicaciones en el entorno basadas en el diseño y despliegue de “*Smart Contracts*” (“Contratos Inteligentes”), los cuales permiten diversificar las funciones de la tecnología según las necesidades de cada industria. En el sector eléctrico, la tecnología *blockchain* comenzó a ser aplicada en el año 2015 para desarrollar plataformas de transacción de activos entre usuarios *peer-to-peer* asociados a mercados locales de energía. Posteriormente, se ha utilizado este tipo de tecnología en la implementación de servicios de pago en el área de la electromovilidad, aplicaciones en seguridad de redes eléctricas, y modelos de control y gestión activa de recursos energéticos distribuidos en micro-redes [1].

Las características particulares de las micro-redes, como redes que vinculan cargas eléctricas con fuentes de generación distribuida en baja tensión, convierten a estos sistemas en el medio físico indicado para la implementación de tecnologías descentralizadas en el sector eléctrico, habilitando el diseño y puesta en marcha de proyectos como “*Brooklyn Microgrid*”, que corresponde a una micro-red residencial en la cual los usuarios pueden transar energía localmente en un mercado comunitario habilitado por *blockchain*, además de gestionar servicios hacia la red de distribución por medio de esquemas distribuidos [8].

A partir de los antecedentes previamente detallados, la presente memoria de título desarrolla una exploración de las múltiples oportunidades de aplicación que ofrece la tecnología *blockchain* en el contexto de las micro-redes, entendiendo ambas tecnologías como elementos complementarios, capaces de habilitar un cambio de paradigma en la operación tradicional de los sistemas eléctricos de potencia.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

El objetivo general de la presente memoria de título corresponde al diseño e implementación computacional de un entorno de aplicaciones descentralizadas habilitado por medio de tecnología *blockchain* para un modelo de micro-red *on-grid* de estudio, incorporando la operación de dos esquemas teóricos explorados en la literatura para integrar y analizar las aplicaciones de mercado local de energía y sistema de gestión de la demanda en la micro-red.

En función de la exploración preliminar de las aplicaciones descentralizadas desarrolladas en el ámbito de las micro-redes y la implementación del modelo de estudio que propone el presente trabajo de título, se estudia la factibilidad económica y técnica de los algoritmos distribuidos integrados en la simulación, de acuerdo con los resultados de la operación de los servicios desplegados en la red *blockchain*.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que engloba el desarrollo de la presente memoria de título corresponden a:

- Investigar los antecedentes teóricos y prácticos de la tecnología *blockchain* presentes en la literatura, caracterizando los atributos y protocolos de operación de esta tecnología en aplicaciones orientadas al sector eléctrico.
- Realizar una exploración de las oportunidades de integración de tecnologías distribuidas en esquemas de operación y comunicación orientados a aplicaciones en el contexto de las micro-redes y la generación distribuida, detallando el estado del arte de estas aplicaciones de acuerdo con una revisión bibliográfica de las investigaciones que se han llevado a cabo en los últimos años en torno a esta temática.
- Implementar la simulación de un ambiente de participación de múltiples agentes distribuidos de una micro-red habilitado por tecnología *blockchain*, a partir de las características intrínsecas de los usuarios definidos en el modelo y las aplicaciones desplegadas en la red.
- Estudiar el desarrollo de un mercado local de energía (LEM) y un esquema distribuido de gestión de la demanda (DSM) en la micro-red diseñada, a partir de la interacción con el despliegue de los *smart contracts* implementados para ejecutar las funciones de dichas aplicaciones.
- Validar y evaluar los esquemas implementados en la micro-red de estudio, considerando las características de diseño del modelo de simulación en el entorno *blockchain*, y las implicancias técnicas de la ejecución práctica de los algoritmos presentados en el trabajo.

1.3. Alcances

Mediante el entorno de desarrollo *Hardhat* se diseñan dos *smart contracts* que habilitan las aplicaciones descentralizadas de mercado local de energía y gestión de la demanda utilizando el lenguaje *Solidity*. El mecanismo de mercado de doble subasta de precio uniforme y la optimización de las programaciones de consumos de los usuarios se simula de forma horaria, utilizando *Web3* para comunicar las decisiones de los usuarios con el nodo *Ethereum* local, determinando las estrategias privadas mediante la ejecución de optimizaciones locales en *FICO Xpress* desde *JavaScript*, y comunicando esta información a los *smart contracts*.

La simulación de las aplicaciones previamente mencionadas se realiza de forma independiente y complementaria, considerando como base operacional un punto de conexión con el suministro de la red de distribución no sujeto a fallas. La integración de fallas del sistema requeriría la consideración de nuevas restricciones operacionales que los modelos presentados en este trabajo no incorporan.

1.4. Estructura de la Memoria

La estructura de la presente memoria de título, dividida en los capítulos que presenta el documento, se detalla a continuación:

- 1. Introducción:** En el primer capítulo se detallan los antecedentes preliminares de la investigación, además de las motivaciones que justifican el tema trabajado en la presente memoria de título, haciendo énfasis en las aplicaciones de la tecnología *blockchain* en el sector eléctrico y los desafíos futuros que presentan los sistemas eléctricos tradicionales. A partir de esta motivación, se detallan los objetivos generales y específicos del trabajo de título, además de la estructura global del documento.
- 2. Marco Teórico y Estado del Arte** En el marco teórico se detallan las características de diseño y los fundamentos teóricos de la tecnología *blockchain* como esquema de registro distribuido, además de los modelos de implementación que involucran este tipo de redes. Por otro lado, el estado del arte presenta la exploración de las aplicaciones desarrolladas en la tecnología *blockchain* orientadas al sector energético, considerando la integración de estos esquemas en el ámbito de las micro-redes y la generación distribuida.
- 3. Metodología** En el tercer capítulo se detalla la metodología de desarrollo e implementación del presente trabajo de título, presentando el marco de referencia y los alcances de las simulaciones operativas de la micro-red, ejecutadas para las aplicaciones distribuidas de mercado local y gestión de la demanda desplegadas en la tecnología *blockchain*.
- 4. Resultados y Discusión** En el cuarto capítulo se presentan los resultados de los modelos computacionales detallados en la metodología del proyecto, discutiendo los alcances e implicancias del trabajo desarrollado en función de los algoritmos implementados en el modelo de simulación de la micro-red de estudio.
- 5. Conclusiones y Trabajo Futuro** Finalmente, en el quinto capítulo se presentan las conclusiones del proyecto desarrollado en la memoria de título, además del trabajo futuro que se propone en torno a la temática y a los objetivos abordados por el documento.

Capítulo 2

Marco Teórico y Estado del Arte

El presente capítulo detalla el marco teórico que engloba los fundamentos de desarrollo de la tecnología *blockchain*, como también las bases teóricas y prácticas involucradas en el diseño y estudio de las micro-redes.

Además, se presenta el estado del arte referido a la aplicación de sistemas basados en *blockchain* en el contexto de la generación distribuida y las micro-redes, detallando cualitativamente los esquemas habilitados por la tecnología presentes en la literatura.

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Micro-redes

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) define el concepto de micro-red como: “*Un grupo de cargas interconectadas y recursos energéticos distribuidos (DERs) con fronteras eléctricas claramente definidas, que actúa como una entidad controlable con respecto a la red principal, y puede ser conectada y desconectada para habilitar la operación en conexión con la red o en modo isla*” [9].

A partir de esta definición, las micro-redes se relacionan con sistemas de potencia que vinculan cargas eléctricas, unidades de generación distribuida y sistemas de almacenamiento de energía de forma coordinada, habilitando la operación autónoma o aislada de la red de distribución, como también la gestión local de los recursos energéticos acoplados dentro de las fronteras topológicas de estos sistemas.

La investigación de los alcances técnicos y metodológicos, relativos a la implementación de este tipo de redes eléctricas en comunidades e industrias de pequeña escala, ha percibido un desarrollo sostenido durante los últimos años, integrando nuevas tecnologías de información orientadas a complementar las características y fundamentos de diseño que engloban a estos esquemas [10].

En función de esto último, los atributos básicos que introducen este tipo de arquitecturas de red, en contraste con otros sistemas tradicionales de distribución de energía, se presentan a continuación [11]:

- Integrar un punto de conexión común (PCC) con la red eléctrica de distribución u operar de forma aislada.
- En caso de estar conectada con la red de distribución, habilitar la operación autónoma o en modo isla de la micro-red.
- Agrupar a los participantes del sistema en un único agente operativamente gestionable por la red eléctrica convencional.
- Interconectar cargas eléctricas, generación distribuida y sistemas de almacenamiento de energía presentes en el sistema.
- Incorporar una mayor calidad, seguridad y flexibilidad de suministro eléctrico a los participantes de la micro-red.
- Permitir una interacción coordinada con la red de distribución para gestionar mecanismos de optimización de recursos energéticos y servicios complementarios.

2.1.1.1. Tipos de micro-redes

De acuerdo con sus características topológicas, particularmente en función de la conectividad con la red de distribución, las micro-redes pueden clasificarse en sistemas *on-grid* y *off-grid*. Ambos esquemas de conexión presentan atributos técnicos específicos según sus requerimientos de suministro y restricciones de operación, siendo aplicados bajo distintos enfoques de diseño a partir de la disponibilidad práctica del suministro eléctrico desde la red convencional.

- **Micro-red *on-grid***

Las micro-redes *on-grid* presentan un punto de acoplamiento común con la red eléctrica de distribución, pudiendo operar en conexión activa con la red convencional, como también en modo isla o con restricción de suministro. Este último modo de operación puede ser inicializado de forma intencional o producto de una falla en la infraestructura de la red que efectúa el suministro [10].

Por otro lado, las micro-redes *on-grid*, al presentar una conexión con el sistema eléctrico de distribución, pueden gestionar diversos esquemas comunitarios para incorporar servicios complementarios hacia el operador del sistema, incentivando la participación de los usuarios de la red en protocolos de coordinación de recursos energéticos distribuidos para maximizar los beneficios de los participantes de estos modelos. En este sentido, se han investigado diversas aproximaciones a la ejecución de estos servicios, considerando metodologías orientadas a maximizar los beneficios sociales de estos sistemas en métodos de coordinación centralizada, como también por medio de aproximaciones distribuidas, en donde los usuarios determinan sus estrategias locales para desplegar servicios al sistema [12].

- **Micro-red *off-grid***

Las micro-redes *off-grid* o micro-redes aisladas corresponden a sistemas eléctricos de pequeña escala que no pueden ser conectados a la red de distribución eléctrica debido a razones de disponibilidad técnica, como la lejanía física de la micro-red a la red convencional y los costos asociados a la implementación de una solución de conectividad entre ambas redes.

Estos sistemas usualmente proveen de suministro eléctrico a pequeñas localidades y comunidades rurales, integrando medios de generación basados en energías renovables no convencionales, sistemas de almacenamiento de energía comunitarios y unidades de reserva como generadores de combustible diesel, además de sistemas de gestión de energía (EMS) que integran modelos de optimización de los recursos energéticos distribuidos presentes en este tipo de sistemas.

En el sector nacional, un ejemplo de implementación práctica de estas redes corresponde a la micro-red de Huatacondo, la cual habilita y gestiona el suministro eléctrico de los consumos asociados a una pequeña comunidad ubicada en la región de Tarapacá que se encuentra aislada de la red de distribución eléctrica, permitiendo abastecer la demanda del sistema con energía renovable no convencional durante gran parte del día [13].

2.1.1.2. Componentes del sistema

El diseño y la implementación práctica de micro-redes usualmente integra una serie de componentes estructurales básicos que determinan la operación y gestión diaria de estos sistemas, incluyendo estos componentes en esquemas coordinados de mayor complejidad para incorporar servicios a la red de distribución (en el caso de micro-redes *on-grid*), como también en modelos de optimización local de los recursos del sistema.

En este sentido, los componentes estructurales que han sido introducidos en el diseño e investigación de la operación de micro-redes corresponden a [14]:

- Recursos energéticos distribuidos
- Sistemas de conversión de potencia
- Controladores y sistemas de gestión de la energía
- Cargas eléctricas
- Sistemas de comunicación
- Sistemas de protección

- **Recursos energéticos distribuidos**

Los recursos energéticos distribuidos (DERs) corresponden a tecnologías de generación y almacenamiento de energía de pequeña escala conectadas a redes de baja y media tensión, habilitando el suministro eléctrico local de los consumos y la integración de flexibilidad operacional en la gestión diaria de estos sistemas.

En este sentido, estas tecnologías usualmente integran instalaciones de potencia en el rango de los 3 [kW], pero dependiendo del sector de aplicación de estos sistemas, la potencia instalada puede alcanzar el rango de los 10 [MW], de acuerdo con las necesidades particulares del suministro [15].

Las instalaciones de generación distribuida en este contexto se dividen en tecnologías de generación convencional y no convencional. Los generadores convencionales corresponden al segmento de generadores síncronos que operan por medio de combustión interna, utilizando usualmente combustible diesel, los cuales son despachados bajo condiciones de restricción o déficit del suministro local de energía en el sistema. Los generadores no convencionales representan instalaciones no despachables asociadas a energías renovables, como instalaciones de paneles solares y turbinas eólicas, las cuales dependiendo de la configuración de la micro-red se encuentran acopladas por sistemas de conversión de potencia (PCS) [16].

Por otro lado, los sistemas de almacenamiento de energía varían desde distintas clases de baterías y pilas de combustible hasta almacenamientos térmicos, los cuales participan en modelos de optimización dirigidos por los sistemas de gestión energética (EMS) de la red. Estos dispositivos permiten incorporar seguridad de suministro, flexibilidad operacional y optimización económica en la gestión diaria del sistema.

- **Sistemas de conversión de potencia**

Los sistemas de conversión de potencia (PCS), también llamados conversores o convertidores, corresponden a tecnologías de electrónica de potencia que permiten el acople y operación de dispositivos eléctricos como paneles solares, microturbinas y sistemas de almacenamiento de energía, mediante la regulación de la transformación entre corriente alterna (AC) y corriente continua (DC), como también entre distintas frecuencias de estas señales, permitiendo incorporar sistemas de control de tensión, frecuencia, potencia activa y potencia reactiva en la operación de una micro-red [17].

• Controladores y sistemas de gestión energética

Los sistemas de control en micro-redes corresponden a tecnologías que permiten asegurar un funcionamiento estable y eficiente en la operación de estos sistemas, incorporando estándares básicos de calidad del suministro eléctrico y gestión de los recursos energéticos distribuidos disponibles en la red. En este sentido, las categorías de control que incorporan estos esquemas se dividen en control primario, control secundario y control terciario, según las funcionalidades que otorguen a la estabilización de la red [10]:

1. El control primario se asocia con los mecanismos de regulación del voltaje y la frecuencia, como también con el control de la circulación de corriente entre los recursos energéticos distribuidos que presenta el sistema.
2. El control secundario actúa posteriormente al control primario, compensando las desviaciones de voltaje y frecuencia respecto a los parámetros nominales de la red causadas por el accionamiento del control primario.
3. El control terciario actúa con posterioridad a los dos primeros niveles de control y se asocia a los mecanismos que permiten estabilizar la operación óptima del sistema de forma generalizada y en conexión con la red convencional.

Por otro lado, los sistemas de gestión energética (EMS) corresponden a dispositivos que ejecutan protocolos computacionales para determinar la operación óptima de la micro-red en función de la información desplegada en el sistema de comunicación que engloba recursos energéticos distribuidos, perfiles de carga eléctrica y pronósticos de operación del modelo [17].

En este sentido, la Figura 2.1 detalla esquemáticamente los parámetros que intervienen usualmente en un sistema de gestión de la energía orientado a operar una micro-red.

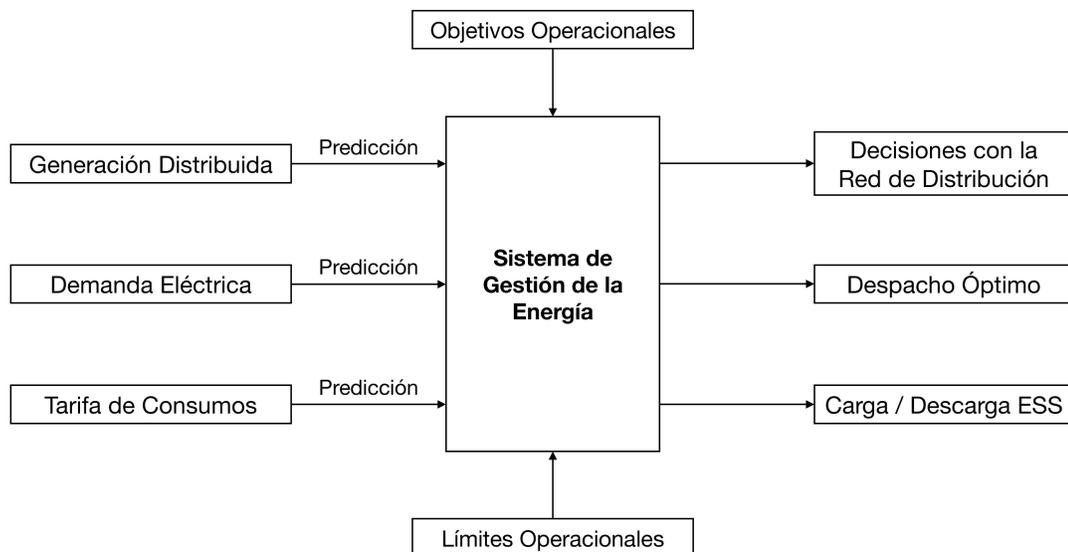


Figura 2.1: Esquema operativo de un sistema de gestión de energía (EMS).

- **Cargas eléctricas**

Las cargas eléctricas se relacionan con los consumos energéticos de los múltiples dispositivos integrados en los nodos que componen la micro-red. Estas cargas pueden categorizarse como cargas controlables en función de su participación en esquemas de gestión y respuesta de la demanda del sistema, habilitando la incorporación de posibles beneficios económicos u operativos en la comunidad [18].

Por otro lado, las cargas del sistema pueden dividirse en consumos críticos y no críticos, de acuerdo con la importancia de un suministro eléctrico estable en la operación de la red. Las cargas críticas se asocian con dispositivos que deben ser abastecidos de forma constante, a pesar de los costos de la generación local respectiva, mientras que las cargas no críticas corresponden a consumos programables que no representan mayor importancia en la operación del sistema.

- **Sistemas de comunicación**

Los sistemas de comunicación aplicados en micro-redes habilitan el control y el monitoreo de las múltiples variables operativas asociadas con las instalaciones presentes en la red. El tipo de operación de estos sistemas se relaciona directamente con el diseño integral de los esquemas de control y gestión de recursos que participan en el modelo.

De esta forma, estos sistemas se desarrollan regularmente sobre una arquitectura de información basada en protocolos de comunicación como los que integra el modelo TCP/IP, permitiendo incorporar cuatro capas de servicio en la red, las cuales corresponden a las capas de aplicación, transporte, internet y acceso al medio. Además, se ha explorado la aplicación de diversos protocolos de comunicación relativos al estándar IEC 61850, con el objetivo de habilitar la conexión entre componentes del sistema y dispositivos inteligentes [18].

- **Sistemas de protección**

Los sistemas de protección se encargan de responder a las fallas sistémicas en la infraestructura de la micro-red y las provenientes desde la red de distribución conectada al sistema. Estos esquemas integran el accionamiento del interruptor de suministro en el punto de acoplamiento con la red convencional, como también los seccionamientos internos de la micro-red para aislar eficazmente el punto de falla en la infraestructura.

En el contexto particular de las micro-redes, los sistemas de protección tradicionales deben ser adaptados para satisfacer los requerimientos específicos de los sistemas de conversión de energía que integran los medios de generación distribuida. En este sentido, las corrientes de cortocircuito en la operación en modo isla de la red no presentan magnitudes adecuadas para utilizar dispositivos de protección de sobrecorriente tradicionales, incorporando la necesidad de aplicar esquemas de protección avanzados para asegurar la estabilidad operativa de estos sistemas [19].

2.1.2. Blockchain

La tecnología *blockchain* corresponde a un esquema de registro distribuido integrado por bloques concatenados de información estructurada por medio de mecanismos de criptografía avanzada. El atributo principal de esta tecnología se relaciona con el almacenamiento y operación de información de forma descentralizada, mediante un registro único, consensuado y distribuido globalmente en los nodos que integran la red *peer-to-peer* del sistema. Los nodos participantes de la red *blockchain* tienen la función de replicar, verificar y compartir periódicamente las acciones ejecutadas sobre el registro descentralizado de datos y metadatos que componen la cadena de bloques, ejecutando aplicaciones distribuidas y transferencias de información entre nodos de la red de forma segura y resistente frente a ataques externos [14].

2.1.2.1. Estructura de datos

Las transacciones almacenadas en el libro mayor distribuido son agrupadas en bloques de registro, estructurados por medio de *hashes* o identificadores de bloques, los cuales operan como huellas digitales de las transacciones que componen la cadena, ordenando cronológicamente los registros almacenados en la base de datos distribuida.

Cada bloque de la cadena contiene el registro de las transacciones previas ejecutadas en el libro distribuido, estructuradas por medio del algoritmo *árbol de Merkle*, el puntero *hash* del bloque predecesor y el código alfanumérico propio, que será enlazado por el bloque sucesor. Esta estructura de datos permite inhabilitar la modificación en el orden o el contenido de los registros asociados a la *blockchain*, la cual es periódicamente validada con respecto a las réplicas digitales distribuidas globalmente en los nodos del sistema [20].

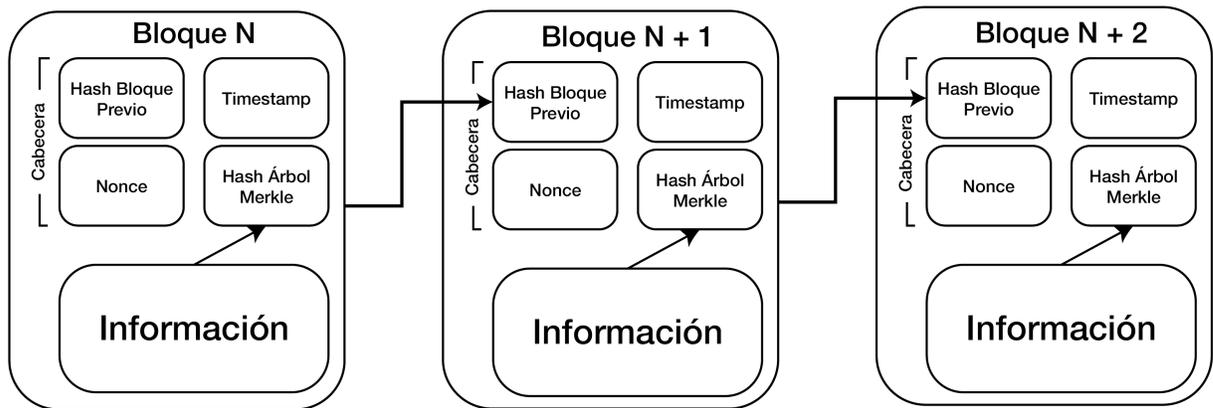


Figura 2.2: Esquema simplificado de registro en *blockchain*.

La Figura 2.2 presenta de forma esquemática la configuración estructural de una *blockchain* simplificada, en donde cada bloque de registro se define por un *hash* o identificador del bloque previo, un *timestamp* o marca de tiempo de la transacción, un *nonce* o número de uso único utilizado en el proceso de autenticación, y un *hash árbol de Merkle* que contiene la información relativa a las transacciones que almacena el bloque.

- **Hash**

El *hash* corresponde al resultado de una función criptográfica utilizada para condensar y codificar cantidades arbitrarias de información en cadenas de caracteres de longitud fija. Las funciones *hash* criptográficas presentan la propiedad de *efecto avalancha*, lo cual provoca que una mínima modificación en la información de entrada b de una función *hash*, genere un cambio significativo en la salida $H(b)$ del algoritmo criptográfico. Esta propiedad de las funciones *hash* se relaciona con el sentido único de la transformación de la información de entrada, imposibilitando el proceso de decodificación del *hash* resultante y resguardando la información original condensada en la cadena de caracteres [21].

Las funciones *hash* criptográficas son aplicadas en algoritmos de verificación de datos, almacenamiento de información privada y firmas digitales de documentos electrónicos. En la tecnología *blockchain*, las aplicaciones de mayor notoriedad de estos algoritmos computacionales corresponden a [22]:

Creación de direcciones Las funciones *hash* son incorporadas en la creación de direcciones de cuenta para carteras de criptodivisas, elevando el nivel de seguridad de las claves públicas asociadas a cada usuario. En la *blockchain Bitcoin* se utilizan las funciones *hash RIPEMD-160* y *SHA-256*, mientras que en la *blockchain Ethereum* se aplica la función criptográfica *Keccak-256* para determinar las direcciones de la billetera.

Minería de bloques En aplicaciones del algoritmo de consenso *Proof of Work* (que será definido posteriormente) como *Bitcoin*, los nodos mineros del sistema realizan el cálculo de *hashes SHA-256* para crear nuevos bloques en el libro distribuido. El procedimiento de resolución de los *puzzles* criptográficos del esquema requiere un alto poder de cómputo, haciendo uso intensivo de la capacidad de procesamiento para crear un número significativo de potenciales *hashes* en la resolución del problema matemático asociado a la incorporación de nuevos bloques.

Contratos inteligentes En el contexto de los *smart contracts*, las funciones *hash* son utilizadas para asignar direcciones a los contratos desplegados en *blockchain*, permitiendo el desarrollo de aplicaciones descentralizadas por medio de la interacción de los nodos del sistema con los *hashes* identificadores definidos para cada contrato.

La Figura 2.3 presenta la aplicación de la función *hash SHA-3* en entradas de diferentes tamaños y distancias, demostrando la propiedad de *efecto avalancha* de la función criptográfica en la asignación de cadenas de caracteres de longitud fija para distintas entradas.

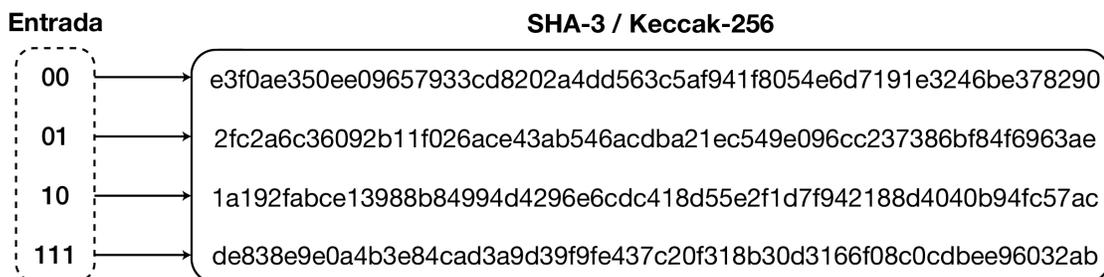


Figura 2.3: Aplicación de función *hash* criptográfica *SHA-3*.

- **Árbol de Merkle**

El *árbol de Merkle* o *árbol de hash binario* es la estructura de datos que permite almacenar los *hashes* de las transacciones individuales que se ejecutan en *blockchain* para asegurar la integridad de la cadena y permitir una verificación distribuida eficiente.

Cada hoja del *árbol de Merkle* se *hashea* y concatena con los *hashes* padres, hasta llegar a la raíz del árbol, la cual corresponde a un *hash* único que contiene la información concatenada de todo el árbol. De esta forma, el ataque al contenido de uno de los bloques que integra el libro distribuido provoca la modificación del *hash* que identifica la entrada objetivo, invalidando secuencialmente toda la cadena con la cual se relaciona estructuralmente [14].

Esta estructura digital es considerada un método eficiente de almacenamiento de registros en aplicaciones de tecnologías de libro distribuido, permitiendo la subdivisión del árbol en sus ramas para ejecutar los protocolos de validación y trazabilidad de las transacciones contenidas en la *blockchain*. En este sentido, el proceso iterativo por el cual se relacionan los bloques del libro contable permite verificar el estado de las entradas predecesoras hasta el bloque inicial de la cadena o *bloque génesis* [23].

La Figura 2.4 detalla una estructura de datos simplificada basada en el algoritmo *árbol de Merkle*, en la que se *hashean* de forma binaria las transacciones *A*, *B*, *C* y *D*, que corresponden a las hojas del árbol asociadas al bloque *N+1*, concatenando y *hasheando* los nodos resultantes de forma iterativa hasta llegar a un *hash* único o *hash raíz* del *árbol de Merkle*.

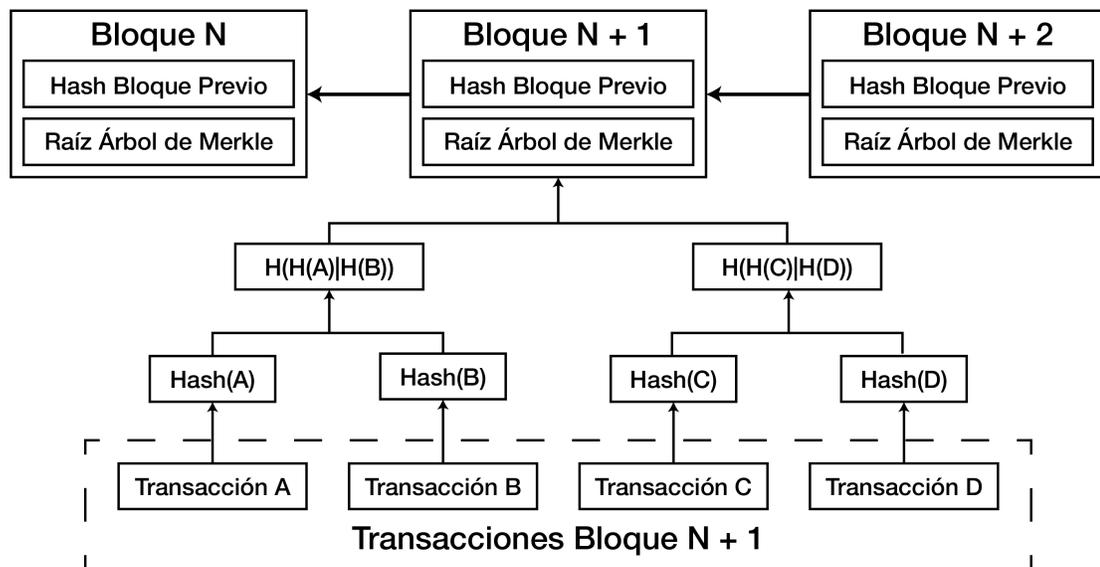


Figura 2.4: Diagrama funcional de la estructura de datos *árbol de Merkle*.

2.1.2.2. Algoritmos de consenso

La arquitectura de identificación de bloques, por medio de *hashes*, provee al esquema *blockchain* de un alto grado de seguridad inicial ante ataques externos efectuados sobre el libro mayor distribuido. En este sentido, el aumento sostenido del nivel de procesamiento asociado a los ciberataques sobre tecnologías *blockchain* podría resultar en algoritmos de modificación de bloques de información que involucren el cálculo de los *hashes* alterados para las entradas subsecuentes del libro distribuido. En función de este potencial peligro, se han desarrollado múltiples protocolos de validación de registros distribuidos, denominados «algoritmos de consenso», los cuales permiten asegurar la integridad de la información almacenada en la tecnología *blockchain* mediante la comunicación periódica entre los nodos que integran la red *peer-to-peer* del sistema [24].

El procedimiento de consenso tiene como objetivo verificar las transacciones y aplicaciones ejecutadas sobre la tecnología *blockchain* antes de ser integradas en el libro mayor distribuido. Los algoritmos de consenso son desarrollados en intervalos de tiempo discretos predefinidos por el instante de inicialización de una transacción y el instante de integración del nuevo bloque resultante en la cadena. El intervalo de tiempo de ejecución del algoritmo de consenso depende del tamaño del bloque, el volumen de la transacción y el tipo de algoritmo de consenso definido en la arquitectura de red.

Los algoritmos de consenso operan de forma distribuida, a diferencia de los modelos tradicionales de confianza centralizada, permitiendo prescindir de agentes intermediarios, tanto de forma interna como externa a la red, distribuyendo el poder de decisión sobre las acciones ejecutadas en el libro mayor distribuido [25].

A continuación, se detallan los principales algoritmos de consenso presentes en el desarrollo de aplicaciones orientadas a la industria por medio de la tecnología *blockchain*, los cuales corresponden a los esquemas *Proof of Work*, *Proof of Stake* y *Proof of Authority*.

- ***Proof of Work* (PoW)**

El algoritmo de consenso *Proof of Work* fue introducido por Jakobsson *et al.* (1999) [26], como un mecanismo por el cual un agente comprobante le demuestra a un verificador la ejecución de un cierto nivel de esfuerzo computacional en intervalos específicos de tiempo, proponiendo el uso de este tipo de protocolos para aplicaciones de seguridad, medición de acceso a servidores y protección contra ataques de denegación de servicio (DDoS).

La conceptualización del algoritmo de consenso *Proof of Work* fue aplicada en el diseño de la criptomoneda *Bitcoin* por Satoshi Nakamoto (2008) [27], asignando la resolución de *puzzles* criptográficos al procedimiento de inserción de nuevas entradas o bloques de información en la tecnología *blockchain*.

Actualmente, *Proof of Work* es el algoritmo de consenso de mayor popularidad en las aplicaciones de tecnología *blockchain* desarrolladas en la industria, particularmente en los sectores orientados a servicios financieros y gestión de criptomonedas, debido a la transparencia e inmutabilidad del protocolo [25].

A continuación, se definen secuencialmente los pasos que involucra la ejecución práctica del algoritmo de consenso:

1. Un usuario o nodo inicializa una conexión con la red *peer-to-peer* habilitada por *blockchain*, desplegándose un *puzzle* criptográfico de alto costo computacional en el sistema.
2. A partir del incentivo económico asociado a la resolución del problema matemático desplegado en el sistema, se ejecuta la minería del nuevo bloque de información con el objetivo de incorporar la entrada en el libro mayor distribuido, aplicando algoritmos de fuerza bruta para verificar el *hash* del nuevo bloque.
3. Posterior a la resolución del *puzzle* criptográfico, el protocolo verifica la factibilidad de la solución presentada, protegiendo al sistema de cualquier doble gasto asociado con una tarea previamente resuelta en el procedimiento.
4. Finalmente, la red despliega la recompensa en forma de criptomonedas al nodo minero que haya logrado resolver el problema criptográfico por medio del uso intensivo de su poder de procesamiento.

En la Figura 2.5 se detallan los procedimientos que integran el desarrollo del mecanismo de minería de bloques en el algoritmo *Proof of Work*. El ejemplo presentado en el diagrama muestra la resolución del *puzzle* criptográfico asociado a la inserción de un nuevo bloque en la cadena, en donde se verifica la validez de la solución emitida por el segundo nodo minero, enviando una recompensa por el trabajo computacional ejecutado.

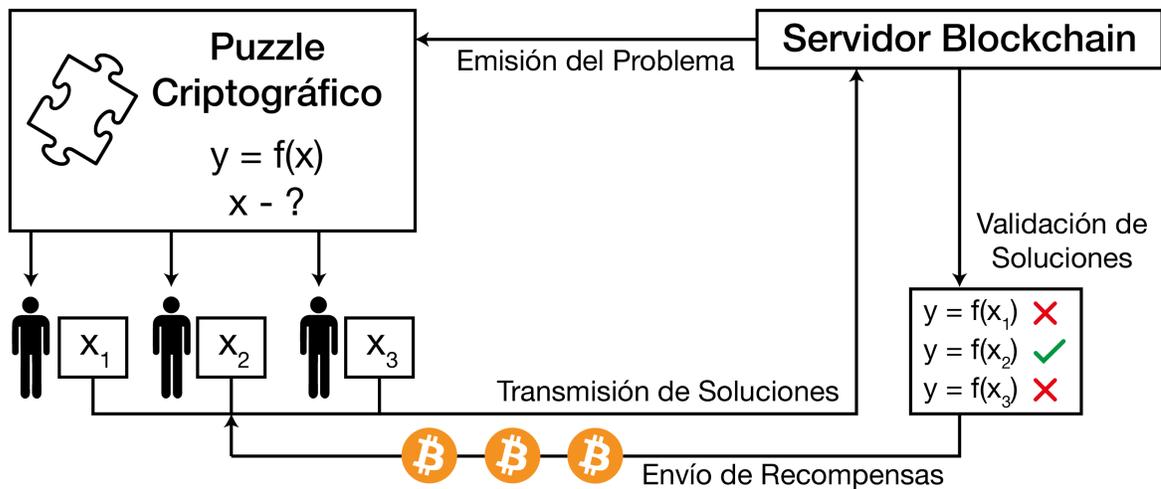


Figura 2.5: Esquema operativo del algoritmo *Proof of Work*.

- ***Proof of Stake (PoS)***

El algoritmo de consenso *Proof of Stake* es el segundo protocolo de validación más utilizado en aplicaciones de tecnología *blockchain*. El procedimiento de verificación de este algoritmo se relaciona directamente con el grado de participación de los nodos validadores en el sistema, asignando un mayor nivel de participación a los agentes con mayor tenencia de criptodivisas y tiempo de participación en la red. En este sentido, para evitar comportamientos monopólicos por parte de los nodos que poseen un alto grado de participación en el protocolo, la selección de los validadores del algoritmo es aleatoria [28].

El protocolo *Proof of Stake* permite una disminución significativa del consumo de tiempo y energía que implica el procedimiento de validación y consenso de la cadena, pero presenta un menor grado de seguridad en comparación con el algoritmo *Proof of Work*. Así mismo, el algoritmo *Proof of Stake* fue introducido para solucionar las problemáticas asociadas a la descentralización parcial del algoritmo PoW y disminuir el interés financiero de los ciberataques hacia el libro mayor distribuido [14].

- ***Proof of Authority (PoA)***

El algoritmo de consenso *Proof of Authority* representa una aproximación con menores grados de descentralización en el proceso de validación de los registros almacenados en *blockchain* respecto a los anteriores protocolos (PoW y PoS). En este esquema, un grupo reducido de nodos autorizados por la red realiza el procedimiento de validación, creación y concatenación de nuevos bloques en el libro mayor distribuido.

De esta forma, los nodos que integran el sistema mediado por el algoritmo PoA depositan su confianza en las decisiones de un grupo de nodos validadores que ponen su identidad y reputación como garantía de transparencia, permitiendo una mayor rapidez en el proceso de validación de la cadena [25].

El algoritmo *Proof of Authority* se encuentra orientado especialmente a aplicaciones en *blockchains* privadas, como las definidas por las redes *Kovan* y *Rinkeby* de *Ethereum*, además de ser utilizado por entornos de desarrollo como *Hyperledger* y *Ripple*, los cuales permiten diseñar e implementar redes de acceso cerrado, en donde un grupo de nodos de confianza desarrolla la validación de los accesos en la tecnología *blockchain* desplegada.

2.1.2.3. Modelos de permiso

En función de la estructura, aplicación y algoritmo de consenso determinados para el registro distribuido de la red *blockchain*, existen diversos tipos de modelo de permiso que engloban a los participantes de estos sistemas, los cuales se encuentran directamente relacionados con el grado de descentralización, administración de datos y nivel de transparencia del registro distribuido en el sistema.

- ***Blockchain Pública***

El modelo de *blockchain pública*, ampliamente utilizado en aplicaciones de criptodivisas, permite el acceso abierto de potenciales agentes y validadores en la red *peer-to-peer*, habilitando la participación de estos últimos en transacciones con otros nodos de la red, por medio de la integración de nuevos bloques en el registro distribuido, de acuerdo con la ejecución de algoritmos de consenso participativos como el *Proof of Work* (PoW) [7].

Las redes *blockchain públicas* suelen transparentar el estado del libro mayor y preservar el anonimato de los participantes de la red, gestionando las entradas a los registros de forma totalmente descentralizada. Los usuarios que ingresan de forma abierta a la red *blockchain* deben replicar la versión actualizada del libro de registros antes de poder acceder a los servicios básicos de la red, como crear nuevas transacciones o participar del proceso de validación de registros.

Respecto a las aplicaciones de esta configuración de redes, las *blockchain públicas* de mayor desarrollo en el área de las criptodivisas corresponden a las criptomonedas *Bitcoin*, *Ethereum* y *Litecoin*. En el sector nacional, la Comisión Nacional de Energía (CNE) desarrolló una *blockchain pública* de código abierto para certificar los datos dispuestos en la plataforma *Energía Abierta*, permitiendo un mayor grado de confiabilidad, seguridad y trazabilidad de la información relativa a la generación y consumo de energía renovable [29].

- ***Blockchain Privada***

Una red *blockchain privada* corresponde a un modelo de permiso en donde una única entidad o unidad central de control ejecuta el procedimiento de verificación y agregación de nuevos registros a la cadena de bloques, además de autorizar o denegar el ingreso de nuevos participantes en la red privada [1].

Este modelo de permiso no considera grados de descentralización o de consenso entre nodos, debido a que las operaciones sobre el libro de registros son administradas de forma privada, por lo que en la aplicación práctica no suelen integrar criptomonedas o realizar procedimientos de minería de bloques.

La diferencia entre un esquema centralizado tradicional y una *blockchain privada* radica en la posibilidad que se otorga a los participantes autorizados del sistema para observar el estado y los cambios periódicos del libro mayor distribuido, además de la posibilidad de habilitar esquemas distribuidos de coordinación de operaciones, en función de los permisos otorgados por la unidad de control del sistema *blockchain* [14].

- **Blockchain de Consorcio**

Las *blockchain de consorcio* corresponden a una aproximación intermedia entre los modelos de permiso público y privado. De esta forma, en las *blockchain de consorcio*, un grupo reducido de nodos tiene la función de verificar y agregar bloques de registros al libro mayor distribuido, además de determinar el acceso de nuevos participantes en la red, lo cual se asocia con las características de participación de las *blockchain privadas*, pero a diferencia de estas últimas, el libro mayor distribuido es accesible de forma pública [1].

Este tipo de *blockchain* es utilizado comúnmente en industrias donde el registro de datos requiere un mayor grado de seguridad, privacidad y transparencia en los procesos internos del sistema, como sucede en algunas aplicaciones desarrolladas en el área de la salud y de las finanzas.

Debido al carácter de consorcio del modelo de permiso, no existe la necesidad de que todos los usuarios que participen en la aplicación tengan una copia del libro de registros, dado que la verificación y creación de bloques es mediada por un grupo de nodos autorizados.

En función de las características de la aplicación y la industria objetivo del modelo, se podrían presentar distintos grados de transparencia de la cadena de registros hacia los usuarios de la red. Una parte importante de las aplicaciones presentes en las industria que están basadas en este modelo han sido implementadas en *softwares* de código abierto, como *Hyperledger* o *Corda* [5].

En la Figura 2.6 se presentan de forma gráfica los distintos modelos de permiso que han sido incorporados en el diseño y aplicación de la tecnología *blockchain* durante su desarrollo.

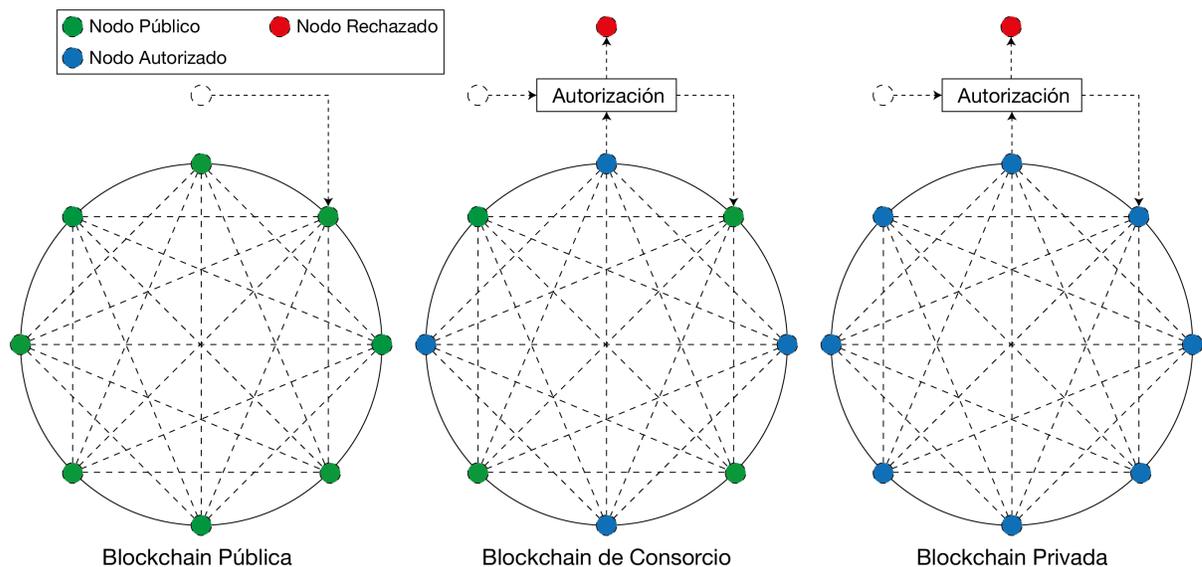


Figura 2.6: Modelos de permiso de sistemas *blockchain*.

2.1.2.4. Atributos de la tecnología

La arquitectura descentralizada de la tecnología *blockchain*, junto a sus protocolos de validación y almacenamiento de datos, por medio de un *ledger* o libro mayor distribuido, posee atributos particulares que la diferencian de otros protocolos de comunicación y registro de información utilizados en las redes tradicionales, en las cuales los registros son almacenados y operados de forma centralizada [5]. Estos fundamentos, que se relacionan directamente con el desarrollo de tecnologías de libro distribuido (DLT), corresponden a:

Descentralización: La arquitectura descentralizada de *blockchain* permite una gestión de la comunicación entre los nodos del sistema sin necesidad de agentes intermediarios, por medio de un registro distribuido de la información que comparten los participantes de la red. La confiabilidad y seguridad del esquema está basada en la aplicación de algoritmos de consenso que verifican el estado de las transacciones almacenadas en la cadena de bloques.

Seguridad: Los modelos de validación de registros y protocolos de consenso distribuido asociados a la red *peer-to-peer* del sistema, aseguran el estado de la cadena de datos frente a ataques externos mediante la aplicación de algoritmos de criptografía avanzada. De esta forma, la replicación del libro contable en los nodos de la red *blockchain* incorpora redundancia al sistema y permite una comparación eficiente del registro histórico de la cadena de bloques.

Velocidad: En algunos algoritmos de consenso, la transacción directa de los nodos, sin estimar intermediarios que comuniquen a los agentes, permite una alta velocidad de transacción y validación por parte de los nodos de la red.

Flexibilidad: *Blockchain* es adaptable a un número considerable de aplicaciones en la industria, permitiendo la existencia de distintos modelos de permiso, algoritmos de consenso y grados de descentralización en el registro distribuido.

Transparencia: Todas las acciones ejecutadas sobre los registros de la *blockchain* son compartidas y replicadas en los nodos que forman la red, permitiendo integrar un alto grado de transparencia en el contenido estructural del libro distribuido.

Las diferencias que posee *blockchain* respecto a los modelos tradicionales de operación de redes centralizadas se detallan en la Tabla 2.1 adjunta a continuación:

Tabla 2.1: Diferencias entre la tecnología *blockchain* y las bases de datos compartidas.

Parámetros	Blockchain	Base de Datos Compartida
Operaciones	Inserción de nuevos bloques	Crear, leer, actualizar y eliminar
Replicación	Copia del libro en cada nodo	Arquitectura Maestro-esclavo
Consenso	Algoritmo de decisión compartida	Independencia de las decisiones
Confidencialidad	Esquema confidencial	No completamente confidencial
Intermediarios	No se necesitan intermediarios	Intermediario opera el esquema
Robustez	Robusta por diseño	Sujeta a fallas y ataques

2.2. Estado del Arte

En la presente sección se expone el estado del arte relativo a las múltiples aplicaciones de la tecnología *blockchain* en la operación, comunicación y gestión energética de sistemas eléctricos en el ámbito de las micro-redes.

Las aplicaciones presentes en la literatura incorporan la participación de agentes descentralizados en *smart contracts* por medio de plataformas *blockchain* que integran metodologías de planificación y operación de recursos energéticos en redes domésticas y comunitarias, habilitando las transacciones de energía entre pares y la coordinación de múltiples protocolos asociados con la gestión del estado del sistema.

A partir de la exploración en torno a las aplicaciones de la tecnología *blockchain* en el contexto de las micro-redes y la generación distribuida, el presente estado del arte incorpora cuatro grupos de esquemas descentralizados que habilita el diseño de sistemas de comunicación y operación mediante tecnologías de registro distribuido (DLT), los cuales se presentan a continuación:

- **Mercados Locales de Energía (LEM).**
- **Sistemas de Gestión de la Demanda (DSM).**
- **Optimización de Recursos Energéticos Distribuidos (D-OPF).**
- **Aplicaciones en Electromovilidad.**

De esta forma, cada una de estas aplicaciones será presentada de forma independiente en el presente estado del arte, detallando los avances y aproximaciones de investigación que han sido desarrolladas durante los últimos años, como también las implementaciones prácticas de cada esquema, en función de los diversos modelos teóricos de gestión y operación que han sido diseñados y aplicados en micro-redes de estudio.

Finalmente, de acuerdo con las aplicaciones detalladas en el presente capítulo, se introduce el desarrollo de la implementación práctica de la memoria de título, determinando las funciones operativas de la plataforma *blockchain* que habilita la simulación computacional del modelo de la micro-red de estudio. En este sentido, se discuten brevemente las principales opciones de aplicaciones distribuidas presentes en la literatura, definiendo los alcances prácticos de la simulación operativa de estos sistemas en torno a la programación computacional del trabajo de la memoria, con el objetivo de determinar los modelos teóricos que incorpora la plataforma *blockchain* descrita en la metodología del proyecto.

2.2.1. Mercados Locales de Energía

En función del incremento en la penetración de recursos energéticos distribuidos (DERs) y generación a nivel residencial, el desarrollo de esquemas descentralizados asociados a transacciones de energía en mercados locales se ha convertido en uno de los principales tópicos de investigación para la tecnología *blockchain* en el contexto de las micro-redes [6].

Las investigaciones e implementaciones prácticas, desarrolladas para estudiar la operación de entornos de múltiples transacciones *peer-to-peer* de energía, introducen la tecnología *blockchain* como una plataforma digital y descentralizada, con la capacidad de habilitar la gestión de mecanismos de mercado locales y modelos de contratos bilaterales entre los participantes de comunidades inteligentes [30]. Dichos esquemas de transacciones *peer-to-peer* de energía sin agentes intermediarios forman mercados de energía de pequeña escala o mercados locales de energía (LEM), englobando sistemas eléctricos como las micro-redes comunitarias. En este sentido, herramientas como la teoría de juegos permiten diseñar y simular entornos de múltiples interacciones entre agentes, en función de mecanismos de mercado desplegados en los sistemas de estudio [5].

Los mercados locales de energía explorados en la literatura se dividen en mercados con día de adelanto, mercados intradiarios, mercados bilaterales y mercados de servicios complementarios. De esta forma, se presenta un resumen de los alcances operativos y las metodologías que definen cada uno de estos esquemas [8]:

- Los mercados con día de adelanto (*day-ahead*) integran modelos predictivos de generación, volúmenes locales de energía y subastas privadas para determinar las estrategias de programación del día siguiente, de acuerdo con modelos de optimización de los recursos energéticos distribuidos (DERs) integrados en el sistema.
- Los mercados intradiarios se ejecutan durante el mismo día de operación sin incorporar una programación previa. Estos mercados integran las decisiones y estrategias privadas de los participantes del sistema para desarrollar mecanismos de despeje de precios de energía, usualmente por medio de subastas entre *prosumidores* de la red.
- Los mercados bilaterales corresponden a esquemas de transacciones de energía desplegados en plataformas que permiten trazar y ejecutar las decisiones de compraventa determinadas por las estrategias privadas de pares de usuarios en el sistema. En estos mercados también se incluyen los modelos de transacción de energía entre micro-redes y comunidades vecinas.
- Los mercados de servicios complementarios se encuentran orientados a satisfacer las necesidades de la infraestructura comunitaria o de la red principal, integrando protocolos de regulación de voltaje y regulación de frecuencia en esquemas participativos asociados a micro-redes.

Por otra parte, los mecanismos de despeje de precio del mercado pueden ser implementados a partir de dos aproximaciones: mecanismos de doble subasta y mecanismos de despeje distribuido. Los mecanismos de doble subasta operan de acuerdo con la transmisión de las solicitudes de compra y venta de energía que emiten los usuarios a un agente operador de la red, despejando el precio del mercado local y asignando las transacciones entre los participantes del sistema. Los mecanismos de despeje distribuido, a diferencia de los mecanismos de doble subasta, operan de acuerdo con una transmisión inicial del operador del mercado a la red, la cual corresponde a un precio de energía que es evaluado por los participantes del sistema, asignando un volumen de energía proporcional como respuesta. Este último proceso se desarrolla de forma iterativa, convergiendo al precio de despeje del mercado local de energía en el sistema.

De esta forma, los mercados locales de energía (LEM) que detalla el presente estado del arte se encuentran fundamentados en la aplicación de la tecnología *blockchain* como una plataforma descentralizada de interacción entre usuarios de una micro-red, a partir de las múltiples aproximaciones de diseño previamente definidas.

Hahn *et al.* [31] definen una arquitectura de transacción descentralizada de contratos de energía dentro de un campus por medio de la *blockchain Ethereum*, demostrando beneficios para los agentes *peer-to-peer* en la interacción con una estructura de mercado intradiario sin la participación de entidades intermediarias. En este sentido, la investigación abarca el desarrollo práctico de una plataforma de mercado fundamentada en el diseño y despliegue de un *smart contract* con la capacidad de almacenar periódicamente las variables de mercado transmitidas desde los nodos participantes de la micro-red, ejecutando una subasta de Vickrey para despejar el precio del mercado local de energía de forma descentralizada.

Foti *et al.* [32] desarrollan un esquema de mercado local de energía intradiario basado en el despliegue de un *smart contract* que almacena y gestiona las interacciones de los usuarios con un mecanismo de doble subasta de precio uniforme ejecutado en la *blockchain Ethereum*. De esta forma, la investigación estudia la definición de los algoritmos computacionales que participan en la aplicación del esquema, considerando distintos grados de descentralización en los procedimientos que involucra la inicialización de los mecanismos de mercado del sistema.

Luo *et al.* [33] proponen un mecanismo de mercado *peer-to-peer* basado en la formación de coaliciones en sistemas multi-agente habilitada por una plataforma *blockchain* que engloba al sistema, en donde los *prosumidores* gestionan y monitorean sus recursos energéticos locales, desplegando solicitudes de negociación a la red a partir de las decisiones determinadas por la lógica incorporada en los sistemas de gestión de energía de los participantes.

Mengelkamp *et al.* [8] detallan el diseño teórico y práctico del mercado local de energía de la micro-red “*Brooklyn Microgrid*”, la cual corresponde a un caso emblemático de implementación de una comunidad inteligente habilitada por tecnología *blockchain*. El mercado intradiario, integrado en la arquitectura de red del sistema, permite ejecutar una doble subasta de precio uniforme para realizar el despeje del precio de energía en el instante de inicialización del mecanismo, una vez almacenadas las pujas y licitaciones de los integrantes del esquema. En este sentido, la flexibilidad de la tecnología permite el estudio y la implementación de otros esquemas de mercado como las subastas *pay-as-bid* de energía en la micro-red.

2.2.2. Protocolos de Gestión de la Demanda

El desarrollo e integración de la tecnología *blockchain* en comunidades inteligentes introduce el potencial de gestionar y coordinar los consumos energéticos de sistemas eléctricos de pequeña escala, con el objetivo de optimizar y beneficiar la operación de la red principal, por medio de la interacción de múltiples agentes residenciales de forma descentralizada y transparente.

En este sentido, los sistemas de gestión de la demanda en micro-redes pueden ser divididos según aproximaciones mediante programación lineal entera mixta (MILP) [34], programación dinámica [35] y teoría de juegos [36]. A partir de las estrategias mencionadas, en las que un operador regula las estimaciones de suministro y demanda presentes en una micro-red para ejecutar la gestión del sistema, la incorporación de tecnologías como *blockchain* permite complementar la respuesta de la demanda con transacciones de energía en el libro contable de la micro-red, integrando el conjunto de beneficios que proporciona el despliegue de *smart contracts* y aplicaciones distribuidas en el sistema.

El modelo desarrollado por Noor *et al.* [37] introduce una aproximación por medio de teoría de juegos al esquema de gestión de la demanda en micro-redes, incorporando de forma paralela un entorno de transacciones de energía entre pares habilitado por la tecnología *blockchain*. La metodología que presenta esta investigación se fundamenta en la ejecución de un algoritmo iterativo orientado a disminuir la razón *peak-promedio* (PAR) del perfil de consumo agregado de la micro-red, considerando los impactos de las restricciones de suministro del sistema y la optimización de los ahorros percibidos por los agentes que participan del esquema. De esta forma, el modelo propuesto por el estudio integra las instalaciones que incorporan flexibilidad al esquema, anexas a los usuarios residenciales de la micro-red, permitiendo la incorporación de protocolos de desconexión y desplazamiento de carga de acuerdo con las preferencias privadas de los agentes.

En el modelo implementado por Wang *et al.* [38] se integran distintos tipos de perfiles de usuario al modelo distribuido de gestión de la demanda propuesto en [37], incorporando perfiles comerciales e industriales en la simulación del sistema, además de nuevas restricciones de suministro y consumo de estos participantes. Al igual que en el protocolo anteriormente detallado, la ejecución de la gestión de la demanda del sistema se basa en el diseño y despliegue de un *smart contract* que almacena los perfiles individuales de carga de los agentes para comunicarlos con el agregador de la micro-red, el cual transmite el vector agregado de carga del sistema para inicializar el algoritmo iterativo.

Por otro lado, Afzal *et al.* [39] desarrollan un esquema de gestión de la demanda basado en teoría de juegos que complementa la programación de consumos privados de los aparatos eléctricos de los agentes con un sistema de transacciones de energía programadas. De esta forma, el modelo propuesto se ejecuta iterativamente en función de las estrategias privadas de los participantes, los cuales transmiten a un *smart contract* desplegado en la red *Ethereum* sus perfiles de carga y ofertas de suministro, intercambiando energía localmente para optimizar los beneficios de los agentes y disminuir los *peaks* de consumo agregado del sistema.

2.2.3. Aplicaciones en Electromovilidad

La integración de tecnología *blockchain* en comunidades inteligentes habilita el desarrollo de aplicaciones paralelas a las que involucran los mercados locales de energía, incorporando esquemas distribuidos de transacciones de energía en donde los usuarios pueden participar en la venta de excedentes del recurso desde la micro-red comunitaria hacia otros agentes externos al sistema local. Uno de los enfoques de investigación de este último tipo de esquemas corresponde a la implementación de estaciones de carga de vehículos eléctricos conectadas físicamente a micro-redes presentes en el segmento de distribución.

De esta forma, las aplicaciones de la tecnología *blockchain* orientadas a electromovilidad presentes en la literatura corresponden a mecanismos de compraventa de energía ejecutados por medio de la inicialización de *smart contracts* desplegados en la red, los cuales comunican y gestionan la carga de vehículos eléctricos, tanto internos como externos al sistema, con operadores locales representantes de las micro-redes comunitarias que integran estaciones de carga en sus infraestructuras de red.

Su *et al.* [40] proponen un modelo de carga de vehículos eléctricos en donde la micro-red es representada por un agregador que gestiona los excedentes de energía locales del sistema, suministrando una infraestructura de estación de carga topológicamente conectada a la comunidad inteligente. De esta forma, el estudio implementa un *smart contract* en la red *blockchain* que permite transar energía con una de estas comunidades inteligentes o con la red de distribución, de acuerdo con el perfil de preferencias de los vehículos eléctricos que participan en el esquema.

Thakur *et al.* [41] presentan un modelo operativo que unifica los intercambios *peer-to-peer* de energía entre micro-redes con los sistema de carga de vehículos eléctricos, incorporando agentes representantes de las infraestructuras de estaciones de carga anexas a los sistemas comunitarios. En este sentido, el esquema comunica múltiples agregadores que engloban a comunidades inteligentes del segmento de distribución para desplegar una estructura coalicional entre las micro-redes del sistema, en donde se ejecutan los mercados *peer-to-peer* internos de cada agregador y se transmiten las pujas de compraventa de energía desde las comunidades inteligentes para suministrar los contratos de carga de vehículos eléctricos entre las micro-redes participantes.

Por otro lado, en [42] se detalla un esquema de transacciones de energía que utiliza redes *blockchain* de consorcio para gestionar la compraventa de electricidad entre comunidades inteligentes y vehículo eléctricos híbridos, habilitando el desarrollo de modelos de respuesta de la demanda en función de la descarga de las baterías asociadas a los vehículos eléctricos del esquema. La aproximación que desarrolla el estudio para optimizar los recursos energéticos del sistema se fundamenta en la ejecución de un mecanismo iterativo de doble subasta orientado a maximizar los beneficios sociales de la comunidad inteligente, demostrando beneficios con respecto a la seguridad, confiabilidad y transparencia del modelo diseñado en la plataforma *blockchain*.

2.2.4. Optimización de Recursos Energéticos Distribuidos

La operación comunitaria de micro-redes mediante esquemas *blockchain* ha cobrado una mayor importancia en los últimos años, debido a la creciente integración de energías renovables distribuidas y sistemas de medición inteligente en los sistemas eléctricos de potencia de pequeña escala.

En particular, el estudio de esquemas de optimización de los recursos energéticos distribuidos (DERs) de las micro-redes se ha convertido en un área de investigación frecuente para la integración de tecnología *blockchain* de acuerdo con la literatura reciente.

La aplicación de plataformas *blockchain* en estas investigaciones ha permitido la exploración de soluciones para operar micro-redes mediante computación distribuida. En este sentido, Munsing *et al.* [12] presentan una metodología basada en un esquema descentralizado de operación, simplificando los modelos centralizados tradicionales de optimización y control de recursos energéticos distribuidos en micro-redes, con el propósito de ejecutar un despacho óptimo de flujo de potencia del set de recursos residenciales presentes en el sistema comunitario.

Esta última aproximación introduce el concepto de flujo de potencia óptimo descentralizado (D-OPF) en las aplicaciones de la tecnología *blockchain* orientadas a micro-redes, incorporando el método de multiplicadores de dirección alterna (ADMM) para descomponer el problema de optimización convexo asociado al despacho óptimo de los recursos, en múltiples subproblemas locales coordinados por un nodo agregador de la red. De esta forma, *blockchain* representa el medio por el cual se ejecuta el algoritmo iterativo de optimización del sistema, sirviendo como una plataforma segura y transparente de programación de los recursos residenciales.

El modelo presentado por Leeuwen *et al.* [30] se encuentra fundamentado en el método de multiplicadores de dirección alterna (ADMM) tratado previamente en [12], incorporando un mecanismo de mercado bilateral de transacciones de energía dentro del entorno *peer-to-peer* de la micro-red. En este sentido, al igual que en la investigación previamente detallada, la ejecución de la optimización de los recursos energéticos distribuidos se incorpora en un algoritmo iterativo habilitado por el diseño y despliegue de un *smart contract* que gestiona las optimizaciones locales de los participantes del esquema, actuando como agregador de la micro-red en el procedimiento.

Por otro lado, Zhu *et al.* [43] y Sulc *et al.* [44] presentan modelos de flujos de potencia óptimos que incorporan procedimientos distribuidos (D-OPF), utilizando aproximaciones basadas en programación semidefinida (SDP) y métodos de multiplicadores de direcciones alternas (ADMM) respectivamente, por medio de tecnologías de información que comunican a los agentes residenciales con un agregador del sistema, el cual ejecuta la optimización de los recursos energéticos distribuidos de la comunidad. En consecuencia, se propone la adaptación e integración de estos protocolos en aplicaciones desarrolladas por medio de tecnología *blockchain*, integrando las ventajas operativas que introducen los *smart contracts* en esquemas descentralizados asociados con micro-redes y comunidades inteligentes.

Discusión del Estado del Arte

A partir de las aplicaciones descentralizadas que habilita la tecnología *blockchain* en la operación y planificación de micro-redes, las cuales fueron introducidas y detalladas en el presente capítulo, la implementación computacional del modelo de estudio que contempla el proyecto de la memoria abarca dos esquemas distribuidos de operación, integrando servicios que pueden ser ejecutados de forma independiente como complementaria en la gestión diaria de los recursos energéticos que engloba el sistema de estudio propuesto.

Para definir las aplicaciones que integran el modelo de estudio del sistema, en función de los servicios definidos en el presente estado del arte, se tomó en consideración la operatividad básica que introduce la programación y diseño de *smart contracts* en la ejecución de protocolos y acuerdos entre pares de la plataforma, incorporando la gestión de activos de criptodivisas presentes en el entorno de desarrollo como aplicación base del sistema de estudio. En este sentido, se determina el diseño de un mercado local de energía (LEM) como aplicación descentralizada base del modelo de micro-red a estudiar, permitiendo la integración directa de la operación de criptomonedas presentes en el entorno de desarrollo *blockchain* y la programación de *smart contracts* en la plataforma.

Considerando la ejecución de transacciones *peer-to-peer* de criptodivisas entre usuarios del sistema como un servicio básico de la plataforma, el mercado local de energía propuesto para el modelo de estudio incorpora un mecanismo de mercado de doble subasta de precio uniforme basado en el esquema definido por Foti *et al.* [32] implementado en la *blockchain Ethereum*, el cual opera periódicamente de acuerdo con las decisiones privadas de los usuarios de la micro-red.

Por otra parte, además del servicio base definido para el modelo del sistema de estudio, el cual incorpora un mercado local de energía entre los participantes de la plataforma, se integra el desarrollo de una segunda aplicación descentralizada en la plataforma *blockchain*, utilizando el diseño práctico de los perfiles nodales de los usuarios y la definición de la arquitectura de una micro-red de estudio basada en la participación comunitaria de *prosumidores* en conexión con la red de distribución. De esta forma, se propone el desarrollo de un sistema de gestión de la demanda habilitado por la plataforma *blockchain* del sistema, basado en la ejecución de un protocolo operativo mediado por el diseño de un *smart contract* de acuerdo con el modelo teórico presentado en [37], el cual introduce una aproximación distribuida capaz de operar de forma complementaria a un mercado *peer-to-peer* entre usuarios de una comunidad inteligente.

Finalmente, de acuerdo con los antecedentes teóricos y prácticos determinados en la exploración de las aplicaciones distribuidas basadas en tecnologías de libro distribuido (DLT) en el ámbito de las micro-redes, el proyecto que detalla la presente memoria contempla la implementación de una plataforma *blockchain Ethereum* que opera la simulación computacional de una micro-red de estudio en la cual se habilita un mercado local de energía (LEM) y un sistema de gestión de la demanda (DSM) mediante algoritmos distribuidos.

Capítulo 3

Metodología

En el presente capítulo se detalla la metodología propuesta para el desarrollo y simulación de un entorno de transacciones de energía y gestión distribuida de la demanda habilitado por tecnología *blockchain*. Las aplicaciones ejecutadas en el modelo utilizan *smart contracts* desplegados en la red, almacenando y operando las variables asociadas a los nodos del sistema para inicializar los algoritmos que se presentan en este capítulo.

La metodología del proyecto se divide en múltiples etapas que detallan la implementación práctica de los esquemas distribuidos en la micro-red, presentando la aplicación computacional de la metodología y la evaluación de los resultados obtenidos en la simulación del modelo diseñado. En función de esto último, a continuación se presentan las fases que componen el proyecto:

- **Modelo de la micro-red:**

1. **Topología del sistema:** Definición de la arquitectura y nodos de la micro-red.
2. **Parámetros del modelo:** Definición de los grupos participantes del sistema.
3. **Perfiles de demanda:** Definición de los consumos y disposiciones grupales.
4. **Perfiles de generación:** Definición de las curvas de generación grupales.

- **Algoritmos distribuidos:**

- **Sistema de Gestión de la Demanda:**

- Implementación computacional del esquema de gestión de la demanda (DSM) utilizando metodología distribuida basada en *smart contract*.

- **Mercado Local de Energía:**

- Implementación computacional del mercado local de energía (LEM) utilizando metodología distribuida basada en *smart contract*.

- **Entorno de desarrollo:** Implementación de una red *blockchain* local de prueba.

3.1. Modelo de la micro-red

La presente sección se subdivide en la determinación de la topología del sistema asociado a la micro-red, el diseño de perfiles de flexibilidad, generación y consumo de cada agente, y la definición del perfil agregado del modelo de prueba.

3.1.1. Topología del sistema

La topología del sistema define el número de agentes participantes en el esquema, los recursos energéticos distribuidos de la red y las restricciones técnicas del modelo, como también las características de consumo privado de cada nodo, el número de habitantes por residencia y la capacidad de almacenamiento local, con el propósito de simular la interacción entre *prosumidores* de distintas características en la plataforma *blockchain* diseñada.

El modelo del sistema a estudiar propuesto para simular el mercado de energía local entre participantes del sistema (LEM) y la aplicación del protocolo diario de gestión de la demanda energética (DSM) se detalla en la Figura 3.1. Este sistema está basado en la topología de la micro-red en baja tensión desarrollada por el Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE) [45], definiendo los perfiles de consumo y generación residencial a partir del tipo de demanda característico de cada grupo determinado en el diseño del modelo de estudio.

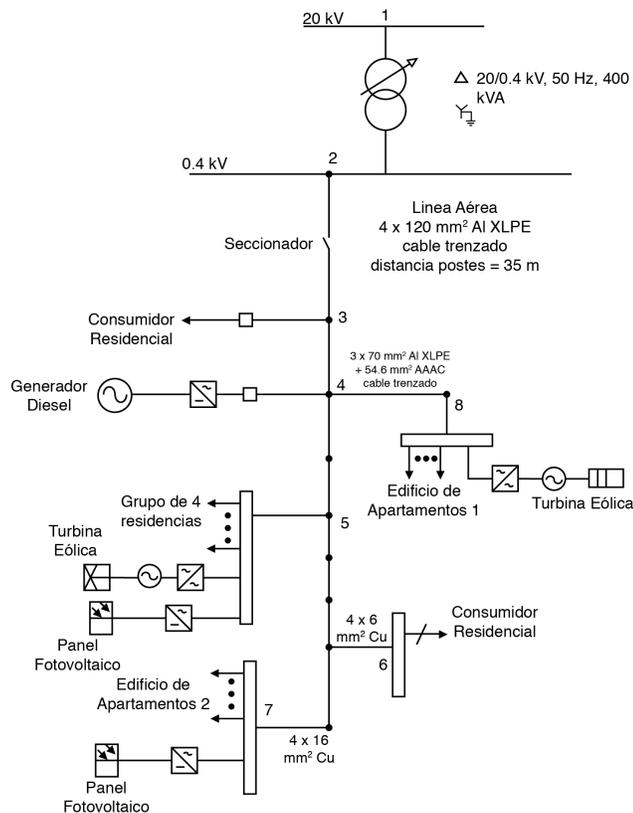


Figura 3.1: Configuración topológica de la micro-red de estudio [45].

3.1.2. Parámetros del modelo

A partir de la topología del modelo de estudio, detallado en la Figura 3.1, se dividieron los nodos del sistema en cuatro grupos de acuerdo con los perfiles característicos de generación, consumo y flexibilidad de los participantes. Los consumos asociados a cada nodo son definidos por el número de residentes y la programación de dispositivos eléctricos diaria, considerando un grupo de aparatos eléctricos que representa la demanda base del agente, y otro grupo que posee una programación flexible para el protocolo de gestión de demanda. Además, se definen las capacidades de almacenamiento de energía de cada grupo de usuarios en la micro-red, considerando una gestión privada de los periodos de carga y descarga de las baterías instaladas, en función de la instalación de generación local y el perfil de demanda del usuario.

De esta forma, se determinaron los perfiles de generación y demanda de los participantes del esquema a partir de la definición de cuatro clases de residencias, que tienen como objetivo diversificar los perfiles de suministro y las necesidades de consumo de los usuarios del modelo de estudio. En este sentido, el primer grupo, compuesto por cuatro residencias de la micro-red, posee un mayor número de ocupantes, mayor capacidad de almacenamiento y generación mixta (eólica y fotovoltaica), representando las características técnicas de un grupo de domicilios de índole familiar. Por otro lado, tanto el segundo como el tercer grupo están compuestos por seis apartamentos con acceso a un solo tipo de recurso energético y una menor capacidad de almacenamiento, además de menores consumos energéticos diarios. Finalmente, el cuarto grupo de agentes, compuesto por dos residencias del sistema, no presenta un suministro local ni capacidad de almacenamiento, actuando exclusivamente como consumidor en el mercado local de energía.

En las Tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 se detallan las características técnicas de los equipamientos residenciales utilizadas en el diseño de los perfiles de generación, demanda y flexibilidad determinados para los cuatro grupos participantes del esquema de prueba.

Tabla 3.1: Grupo 1 -
Parámetros Técnicos.

Grupo 1	
Agentes	1 – 4
Categoría	Casa Aislada
Número de Ocupantes	4
Nodo de la Topología	5
Generación Residencial	Solar / Eólica
Pot. Instalación Solar	1.5 [kW]
Pot. Instalación Eólica	0.5 [kW]
Capacidad de Batería	6.0 [kWh]

Tabla 3.2: Grupo 2 -
Parámetros Técnicos.

Grupo 2	
Agentes	5 – 10
Categoría	Apartamento
Número de Ocupantes	2
Nodo de la Topología	8
Generación Residencial	Eólica
Pot. Instalación Solar	—
Pot. Instalación Eólica	1.0 [kW]
Capacidad de Batería	3.0 [kWh]

Tabla 3.3: Grupo 3 -
Parámetros Técnicos.

Grupo 3	
Agentes	11 – 16
Categoría	Apartamento
Número de Ocupantes	2
Nodo de la Topología	7
Generación Residencial	Solar
Pot. Instalación Solar	1.2 [kW]
Pot. Instalación Eólica	—
Capacidad de Batería	3.0 [kWh]

Tabla 3.4: Grupo 4 -
Parámetros Técnicos.

Grupo 4	
Agentes	17 – 18
Categoría	Casa Pareada
Número de Ocupantes	4
Nodo de la Topología	3 – 6
Generación Residencial	—
Pot. Instalación Eólica	—
Pot. Instalación Solar	—
Capacidad de Batería	—

Por otra parte, la ubicación definida para la micro-red de estudio, utilizada en el diseño de perfiles de demanda y generación, como también en las estrategias de mercado de los usuarios, corresponde a la ciudad de Londres, Reino Unido. El precio por unidad promedio de energía de la tarifa residencial en la región, de acuerdo con el Departamento de Negocios, Energía y Estrategia Industrial, se eleva a los 0.24 [USD/kWh], considerando este último valor como la tarifa de consumo para los participantes del esquema propuesto [46].

3.1.3. Perfiles de demanda

A partir de la definición de la arquitectura de la micro-red y los grupos de agentes que componen el sistema, se diseñaron los perfiles de demanda de los participantes utilizando la herramienta *CREST*, que corresponde a un modelo estocástico de alta resolución aplicado en la simulación de perfiles de actividad diarios y equipos eléctricos presentes en demandas domésticas. En este sentido, el modelo permite asignar y calibrar los parámetros técnicos relativos a la actividad eléctrica y térmica de la demanda simulada, como el tipo de construcción residencial, la ubicación física de la demanda o el número de ocupantes que compone el perfil de consumo [47].

El diseño de perfiles de demanda en la herramienta *CREST* integra un seguimiento temporal de las cargas asociadas a la asignación de dispositivos eléctricos presentes en la simulación diaria, a partir de los parámetros asignables representativos del consumo residencial, detallados previamente en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4. Los consumos desagregados por tipo de dispositivo eléctrico, determinados en el diseño de los perfiles residenciales, fueron utilizados para elaborar la programación diaria de consumos que incorpora la simulación del sistema de gestión de la demanda habilitado por la plataforma *blockchain* de la micro-red.

La Figura 3.2 detalla el perfil promedio de los consumos agregados de la micro-red en el periodo semanal de simulación del esquema, presentando la proporción de demanda asociada a los grupos definidos en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

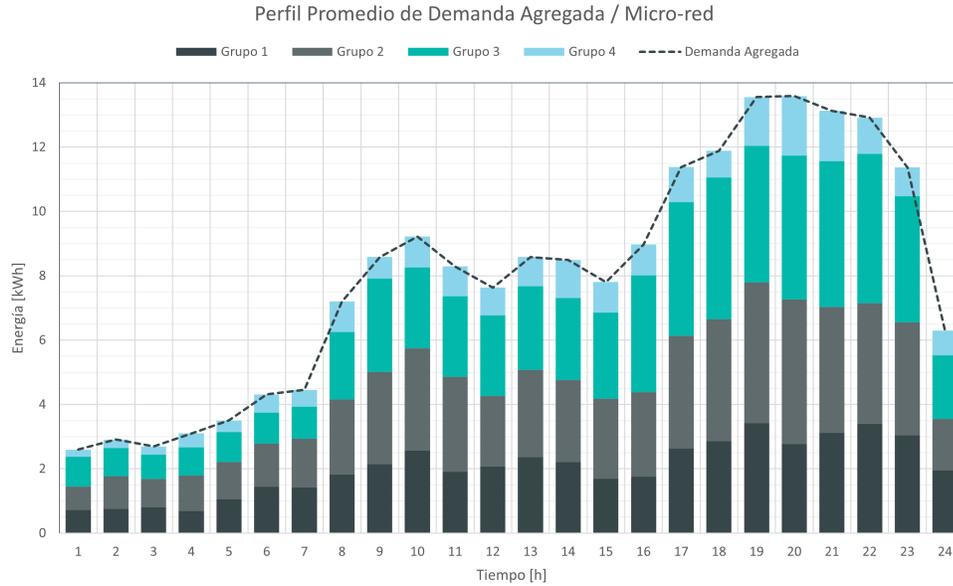


Figura 3.2: Perfil promedio de demanda semanal.

A partir de los perfiles individuales de consumos desagregados diseñados por la herramienta *CREST*, se determinaron los parámetros nominales y límites operacionales de los dispositivos eléctricos presentes en el sistema, además de la disposición de desplazamiento de carga w de cada dispositivo según el perfil de usuario definido por su grupo de pertenencia. En este sentido, cabe mencionar que un mayor valor en el índice w asociado a un dispositivo (con w entre 0 y 1) representa un mayor costo de disconformidad de desplazamiento de carga respecto a su programación inicial [37].

La Tabla 3.5 presenta los parámetros de operación y gestión de la demanda que integran las cargas desplazables del modelo de estudio.

Tabla 3.5: Parámetros de las cargas desplazables del sistema.

Dispositivo Eléctrico	P_{min} [kW]	P_{nom} [kW]	P_{max} [kW]	w_1	w_2	w_3	w_4
Lavadora	0.6	2.3	3.5	0.4	0.6	0.9	0.6
Lavadora/Secadora	0.6	2.5	3.5	0.6	0.6	0.9	0.8
Lavavajillas	0.1	1.2	2.4	0.7	0.7	0.9	0.6
Secadora	0.2	2.4	2.7	0.5	0.7	0.9	0.5
Aspiradora	—	2.1	—	0.4	0.7	0.8	0.5
Cocinilla	—	1.2	—	0.5	0.6	0.9	0.6
DESWH	—	2.8	—	0.7	0.9	0.7	0.6
Encimera	—	2.4	—	0.4	0.6	0.8	0.5
Horno	—	2.4	—	0.5	0.6	0.9	0.5
Microondas	—	1.3	—	0.4	0.8	0.8	0.5
Plancha	—	1.1	—	0.4	0.5	0.8	0.5

Por otra parte, la Tabla 3.6 detalla los parámetros asociados a los consumos que representan la demanda base de la micro-red (dispositivos no desplazables por el DSM).

Tabla 3.6: Parámetros de las cargas no desplazables del sistema.

Dispositivo Eléctrico	P_{nom} [W]	Dispositivo Eléctrico	P_{nom} [W]
Congelador Horizontal	184.3	TV 1	124.5
Refrigerador/Congelador	180.2	TV 2	130.9
Refrigerador	106.5	TV 3	116.1
Congelador Vertical	146.0	DVD	33.1
Contestadora	1.1	Receptor	26.7
Reproductor de CD	15.2	Computador	142.9
Reloj	1.0	Fax	35.7
Teléfono	1.0	Impresora	333.3
Parlantes Hi-Fi	89.8	Luces	0.4

3.1.4. Perfiles de generación

En función de los parámetros técnicos expuestos en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 para los participantes del modelo de simulación, se determinaron los perfiles de generación de la micro-red, asignados de forma independiente a cada usuario según el tipo de la instalación local. De esta forma, se diseñaron curvas asociadas al nivel de generación por tipo de recurso para el desarrollo de la simulación del entorno, utilizando la herramienta *CREST* para construir las curvas de generación de los agentes, las cuales son presentadas en la Figura 3.3 de forma agregada en el periodo de una semana.

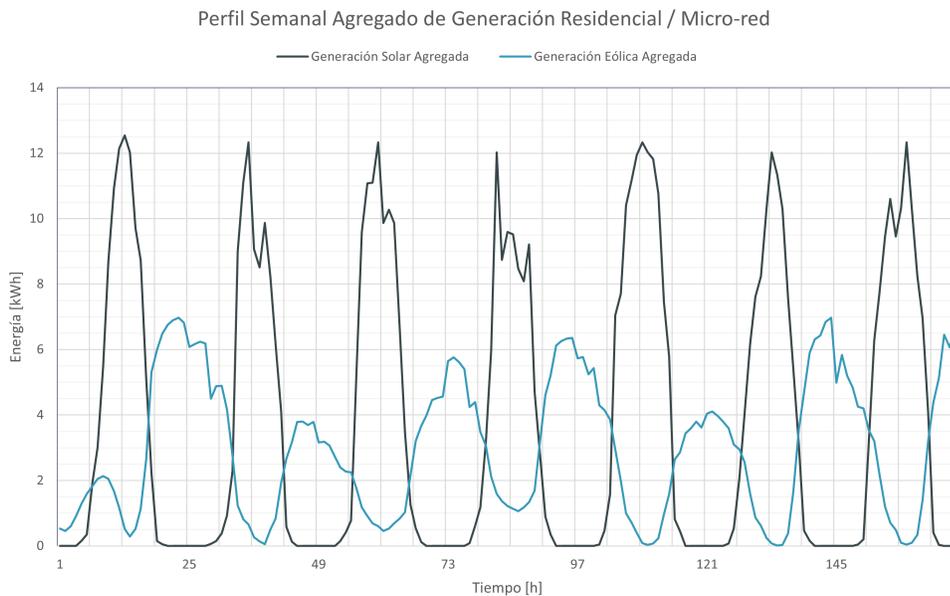


Figura 3.3: Curvas de generación agregada.

3.2. Algoritmos distribuidos

En la presente sección se detalla la metodología implementada en el desarrollo de las aplicaciones distribuidas habilitadas por la red *blockchain* del modelo de simulación. De esta forma, se presentan los algoritmos computacionales que son ejecutados en los procedimientos locales de los usuarios y las aplicaciones que toman lugar públicamente en el libro distribuido, por medio del despliegue de *smart contracts* diseñados para almacenar y operar los parámetros relevantes en los esquemas descentralizados del sistema.

En este sentido, ambas aplicaciones pueden ser desplegadas en el sistema para incorporar un entorno de mercado local de energía que se desarrolla a partir de una optimización previa de la programación individual de consumos de cada agente, de acuerdo a la operación del sistema de gestión de la demanda con un día de adelanto.

La Figura 3.4 detalla la línea temporal de operación de ambos esquemas distribuidos, en donde el sistema de gestión de la demanda se desarrolla desde las 8 de la noche del día previo, optimizando los perfiles de consumo del próximo día mediante el algoritmo iterativo de los participantes, mientras que el mercado local de energía mantiene el mecanismo de doble subasta de precio uniforme disponible durante todas las horas del día.

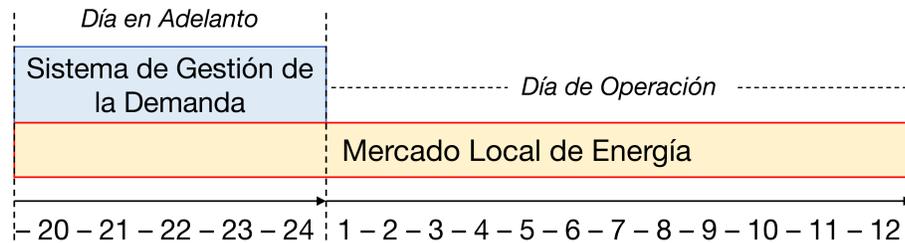


Figura 3.4: Línea temporal de operación de las aplicaciones distribuidas.

En función de la implementación práctica de estos esquemas distribuidos y el diseño de los algoritmos que operan en cada aplicación, la presente sección se divide en los dos servicios desplegados en la plataforma *blockchain* que integra el modelo de la micro-red, los cuales corresponden a:

- Sistema de Gestión de la Demanda
- Mercado Local de Energía

3.2.1. Sistema de Gestión de la Demanda

En la presente sección se detalla el modelo de sistema de gestión de la demanda y los algoritmos distribuidos asociados a la simulación de la aplicación distribuida en *blockchain*.

- **Perfil de demanda individual**

La implementación del esquema de gestión de la demanda integra una gestión individual de los perfiles de carga l_n^t , definidos por cada participante de la micro-red con un día de adelanto.

De esta forma, el vector de demanda l_n^t se separa en un vector de consumo $x_{n,a}^t$, determinado por los consumos de los dispositivos a , y un vector de carga y descarga asociado al sistema de almacenamiento $s_{n,b}^t$, determinado por el equipo b integrado en cada nodo n . La ecuación resultante de la adición de ambos vectores, relativos a cada uno de los usuarios del sistema, se presenta a continuación:

$$l_n^t = \sum_{a=1}^{A_n} x_{n,a}^t + \sum_{b=1}^{B_n} s_{n,b}^t \quad (3.1)$$

- **Perfil de demanda agregada**

A partir de la Ecuación 3.1, la gestión de la demanda diaria total del sistema es definida por el perfil agregado de las cargas horarias individuales de cada agente que participa en el esquema, lo cual queda expresado por la Ecuación 3.2.

$$L_t = \sum_{n=1}^N l_n^t \quad (3.2)$$

La Ecuación 3.2 permite determinar la razón *peak-promedio* (PAR) del sistema agregado, la cual corresponde a un indicador de rendimiento del esquema iterativo de optimización del sistema. En este sentido, el cálculo de este indicador es detallado por la Ecuación 3.3.

$$\begin{aligned} L_{promedio} &= \frac{1}{H} \sum_{n=1}^N l_n^t \\ L_{peak} &= \max \left(\sum_{n=1}^N l_n^t \right) \\ PAR &= \frac{L_{peak}}{L_{promedio}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

- **Costos combinados**

Los participantes del modelo incurren en dos categorías de costos, que se corresponden con los costos de consumo eléctrico, asociados con la programación horaria de los dispositivos, y los costos de malestar o disconformidad, percibidos por el desplazamiento horario de la programación inicial de las cargas de cada dispositivo eléctrico.

De esta forma, la función de costos combinados C es definida por la Ecuación 3.4, en donde $P_t(L_t)$ corresponde a la función de precios del sistema, dependiente de la hora y la carga agregada de la micro-red, y $D_{n,t}(l_n^t)$ corresponde a los costos de disconformidad de los usuarios relacionados con la optimización que ejecuta la gestión de la demanda del modelo.

$$C = P_t(L_t) * k_n^t + D_{n,t}(l_n^t) \quad (3.4)$$

- **Función de precios**

El esquema distribuido que se modela en la micro-red integra una función cuadrática de precios relativa al vector de demanda sistémica L_t , que corresponde a la sumatoria de las demandas horarias individuales de los participantes del sistema. Esta función cuadrática de costos, presentada en la Ecuación 3.5, penaliza los *peaks* de demanda agregada de la micro-red, reduciendo de forma iterativa el índice PAR del sistema.

$$P_t(L_t) = g * L_t^2 \quad (3.5)$$

- **Costos de disconformidad**

A partir de la programación inicial $l_{sch_{n,a}}^t$ de los dispositivos eléctricos flexibles, la optimización de costos locales determina los vectores $l_{n,a}^t$ en función de los costos asociados con la disconformidad percibida por el desplazamiento de carga. En este sentido, el parámetro $w_{n,a}$ representa la disposición o disponibilidad de los usuarios para modificar la programación de un equipo a , de acuerdo con los límites técnicos de operación del dispositivo.

De esta forma, a medida que el valor de $w_{n,a}$ es mayor (entre 0 y 1), el usuario posee una menor disponibilidad de desplazamiento de carga del consumo a respecto a la programación inicial del dispositivo, penalizando los desplazamientos de carga por medio de la función cuadrática que consideran los aumentos y las reducciones de carga en cada instante t . La función de costos de disconformidad que integra los parámetros definidos previamente se detalla en la Ecuación 3.6.

$$D_{n,a}^t(l_n^t) = w_{n,a} * (l_{n,a}^t - l_{sch_{n,a}}^t)^2 \quad (3.6)$$

- **Costos totales**

En función de las dos categorías de costos previamente detalladas en las Ecuaciones 3.5 y 3.6, la constante k_n acopla los aportes del nodo n a la demanda total del sistema, simplificando el cálculo individual de los costos percibidos por los consumidores que participan en el esquema de gestión de demanda de la micro-red. De esta forma, la razón de carga entre el perfil individual de consumo y el perfil agregado del sistema se define como $k_n = \sum_{t=1}^H l_n^t / \sum_{t=1}^H L_t$.

El costo total C , determinado para cada usuario de la micro-red, corresponde a la función objetivo de la optimización local en las iteraciones que ejecuta el esquema distribuido habilitado por la red *blockchain* del sistema. Este costo total asociado a cada nodo del modelo se presenta en la Ecuación 3.7.

$$C_n = \sum_{t=1}^H \left[g * k_n * L_t^2 + \sum_{a=1}^{A_n} w_{n,a} * (l_{n,a}^t - l_{sch_{n,a}}^t)^2 \right] \quad (3.7)$$

- **Restricciones de carga y almacenamiento**

Por otra parte, la gestión privada de los sistemas de almacenamiento de energía, y la programación de los consumos asociados con los dispositivos que integra cada agente, están sujetas a restricciones técnicas y de viabilidad horaria, que determinan la factibilidad práctica de las soluciones del esquema iterativo, relativas a la optimización local de los usuarios.

En este sentido, la Ecuación 3.8 define el consumo diario de energía de la carga a asociada con el nodo n , entre los intervalos de operación factible de los aparatos eléctricos $\alpha_{n,a}$ y $\beta_{n,a}$, restringiendo la solución del vector optimizado de programación, en función del vector de consumo inicial. De esta forma, la optimización local reordena las cargas diarias de los dispositivos, conservando la demanda agregada inicial que programaron los usuarios.

$$E_{n,a} = \sum_{t=\alpha_{n,a}}^{\beta_{n,a}} x_{n,a}^t \quad (3.8)$$

A partir de los intervalos de operación definidos para cada uno de los aparatos eléctricos $H_{n,a}$, se deben cumplir las restricciones de mínimos y máximos técnicos que hacen viable la solución de la optimización, lo cual queda representado por la Ecuación 3.9. Por otra parte, los periodos del día que se encuentran fuera del intervalo $H_{n,a}$, definido para cada dispositivo eléctrico, se asocian a consumos nulos de energía, quedando expresados matemáticamente por la Ecuación 3.10.

$$P_{min} \leq x_{n,a}^t \leq P_{max}, \quad t \in H_{n,a} \quad (3.9)$$

$$x_{n,a}^t = 0, \quad t \notin H_{n,a} \quad (3.10)$$

De acuerdo con la disponibilidad de los sistemas de almacenamiento acoplados a cada nodo, se integra la variabilidad de los estados de carga (SOC) $\lambda_{n,b}^t$ y los máximos técnicos determinados para los equipos, definidos previamente en función de los grupos de usuarios diseñados en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4. Estas restricciones técnicas son representadas por la Ecuación 3.11 adjunta a continuación:

$$- E_{max_{n,b}} \leq \lambda_{n,b}^t \leq E_{max_{n,b}} \quad (3.11)$$

Por otra parte, el vector $s_{n,b}^t$ (detallado inicialmente en la Ecuación 3.1) se encuentra relacionado con la variabilidad de los estados de carga del sistema de almacenamiento, en donde un valor positivo de $s_{n,b}^t$ representa la carga de la batería, y un valor negativo de $s_{n,b}^t$ representa la descarga del sistema de almacenamiento, suministrando energía al consumo del nodo local.

En particular, la energía suministrada por la batería en un intervalo t de tiempo depende del estado de carga, la razón o factor de carga y descarga, y el estado inicial de la batería en el instante t . De esta forma, la energía total en un instante de tiempo que involucra el equipo de almacenamiento no puede exceder su restricción de máximo técnico, lo cual es expresado por la Ecuación 3.12.

$$0 \leq q_{n,b}^0 + \sum_1^t s_{n,b}^t \leq E_{max_{n,b}} \quad (3.12)$$

- **Esquema distribuido**

A partir de la definición matemática del modelo, determinada por las ecuaciones anteriormente detalladas en la presente sección, se implementa un protocolo descentralizado de gestión de la demanda mediante una aproximación basada en un juego no cooperativo entre los usuarios que componen el sistema habilitado por *blockchain*. De esta forma, cada usuario de la micro-red optimiza su función de costos local, a partir de la programación de sus consumos y la gestión interna de sus recursos energéticos, comunicando por medio de la red *blockchain* el vector de demanda l_n^t resultante de la optimización local.

En función de las definiciones presentadas en la Ecuación 3.1, la estrategia que desarrolla cada jugador n se relaciona directamente con los vectores $x_{n,a}^t$ y $s_{n,b}^t$ definidos por la optimización local según el método de punto interior (IPM) del algoritmo iterativo, el cual resuelve el problema de optimización cuadrática convexa del modelo distribuido.

Por otra parte, el vector agregado de demanda del sistema se divide en el vector de carga del consumidor n (l_n^t), y la carga de todos los consumidores restantes del modelo (l_{-n}^t). En este sentido, el parámetro k_n puede ser formulado a partir de la Ecuación 3.13, utilizando el consumo privado de los aparatos eléctricos de cada agente.

$$k_n = \sum_{a=1}^{A_n} E_{n,a} / \sum_{t=1}^H l_{-n}^t \quad (3.13)$$

De esta manera, la función objetivo de la optimización local ejecutada por los agentes en cada una de las iteraciones del esquema distribuido de gestión de demanda queda definida por la Ecuación 3.14, sujeta a las restricciones del modelo presentadas con anterioridad por las Ecuaciones 3.8 – 3.12.

$$P_{n,t}(l_n^t, l_{-n}^t) = \sum_{t=1}^H \left[g * k_n * (l_n^t + l_{-n}^t)^2 + \sum_{a=1}^{A_n} w_{n,a} * (l_{n,a}^t - l_{sch_{n,a}}^t)^2 \right] \quad (3.14)$$

El sistema distribuido de gestión de la demanda (DSM) habilitado por la red *blockchain*, se divide operativamente en dos algoritmos, los cuales son ejecutados de forma independiente por los consumidores y el agregador del sistema. En este sentido, los jugadores de este modelo definen su programación diaria de demanda l_t y la comunican por medio de un *smart contract* diseñado para almacenar las variables del esquema de forma descentralizada, permitiendo que el agregador acceda a las variables del contrato y distribuya el vector agregado L_t para ser posteriormente optimizado por los sistemas de gestión energética locales de los usuarios [37].

El algoritmo propuesto en el proyecto opera de forma diaria agregando las demandas programadas y comunicando la demanda total a los jugadores, los cuales inicializan el algoritmo de optimización de vectores $x_{n,a}^t$ y $s_{n,a}^t$ para maximizar sus beneficios privados. De esta forma, la comunicación del esquema toma lugar hasta alcanzar la convergencia del modelo, según las etapas secuenciales de los algoritmos definidos en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Algoritmos distribuidos del sistema de gestión de la demanda.

Algoritmo 1 - Terminal del Agregador	Algoritmo 2 - Terminal del Consumidor
Recibir la programación inicial de los consumidores	Solicitar el vector agregado de demanda
Calcular y transmitir el vector agregado de demanda L_t	Optimizar el vector de carga l_t usando IPM (<i>Interior Point Method</i>)
Mientras no existan cambios en la programación: inicializar Algoritmo 2	Si el vector cambia:
Actualizar el vector de demanda L_t	Informar al agregador el nuevo vector l_t
Transmitir el vector actualizado L_t	Finalizar el algoritmo
Finalizar el algoritmo	

A partir de los terminales definidos en la Tabla 3.7, la implementación del sistema de comunicación entre ambos algoritmos utiliza el diseño de un *smart contract* desplegado en la plataforma *blockchain* del sistema correspondiente a un nodo local *Ethereum*, para almacenar y gestionar las variables que intervienen en el desarrollo del protocolo.

La Tabla 3.8 presenta la estructura funcional del *smart contract* programado en el lenguaje *Solidity* para ser desplegado en el nodo de *Hardhat*, el cual actúa como la plataforma de comunicación para ejecutar los requerimientos de la implementación práctica del esquema.

Tabla 3.8: Estructura funcional del *smart contract* DSM.

Smart Contract - DSM	Sistema de Gestión de la Demanda
Variabes Globales	Listas públicas del contrato
1. <i>aggDem</i> :	Demanda agregada del sistema.
2. <i>listDem</i> :	Vectores de demanda individuales.
Funciones del Contrato	Funciones principales
3. <i>sendDem(vector, timestamp)</i> :	Envía el vector de demanda agregada del nodo.
4. <i>clearDem()</i> :	Despeja las variables globales del sistema.
5. <i>delDem(index)</i> :	Borra un vector individual de demanda.

En función de las operaciones que almacena el *smart contract* desplegado en la red, la Figura 3.5 presenta esquemáticamente la interacción entre los usuarios de la micro-red con el operador del sistema. En este sentido, los perfiles de carga individuales se almacenan en el contrato hasta que el operador de la red inicializa el proceso de adición de la demanda, desplegando los vectores L_t a la *blockchain* que reciben los usuarios para desarrollar la iteración del mecanismo.

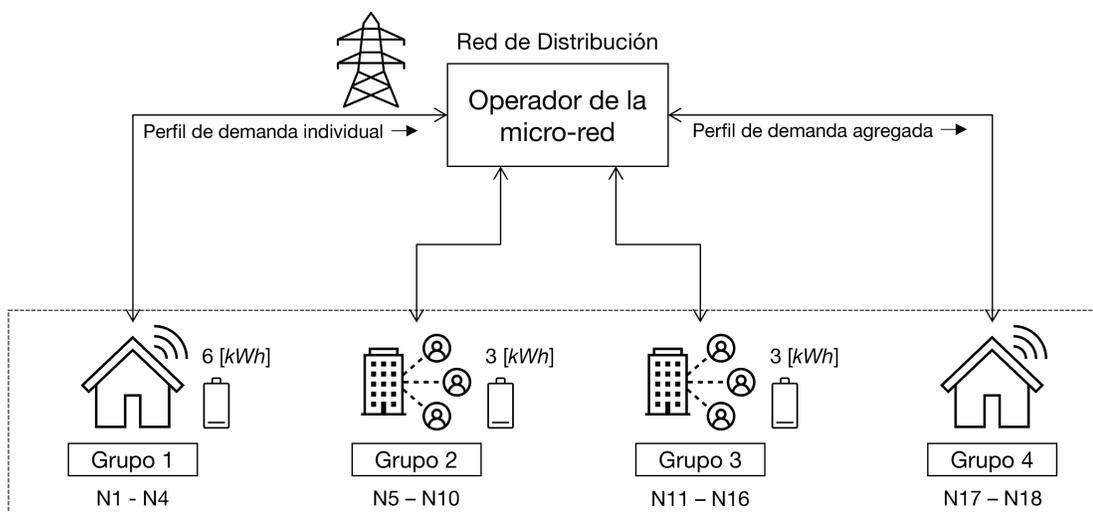


Figura 3.5: Esquema de operación del protocolo de gestión de la demanda.

3.2.2. Mercado Local de Energía

En la presente sección se detalla la metodología implementada para simular un sistema de transacciones de energía *peer-to-peer* habilitado por la plataforma *blockchain* que engloba a los participantes de la micro-red diseñada.

La aproximación descentralizada del mecanismo de mercado de doble subasta de precio uniforme, en la cual participan los agentes distribuidos de la micro-red de estudio, es simulada de forma horaria por medio del despliegue de las funcionalidades integradas en un *smart contract* diseñado para almacenar y gestionar las variables que habilitan el despeje del precio de mercado en la red *blockchain* [32].

El mecanismo de doble subasta de precio uniforme gestiona las transacciones *peer-to-peer* entre los agentes del modelo por medio de la liquidación de los activos energéticos que se ofertan en el periodo de ejecución del mecanismo de mercado. De esta forma, los agentes que perciben un déficit de suministro eléctrico, estimado de forma privada por los sistemas de gestión de energía residenciales, emiten licitaciones de energía al *smart contract* desplegado, en donde se almacenan las variables de estado del sistema de forma horaria. Así mismo, los usuarios que perciben energía excedente de sus instalaciones de generación residencial actúan como oferentes en el mercado *peer-to-peer*, acorde a las decisiones de mercado estimadas de forma privada por los sistemas de gestión de energía.

La Figura 3.6 detalla el esquema operativo de la micro-red en combinación con el mercado local de energía, en donde cada participante integra un sistema de gestión de la energía residencial (HEMS) que participa en comunicación con el operador de la micro-red y con los demás participantes del modelo de estudio, permitiendo ejecutar los protocolos distribuidos de gestión de la demanda detallados previamente, como también la toma de decisiones de mercado en el presente esquema [37].

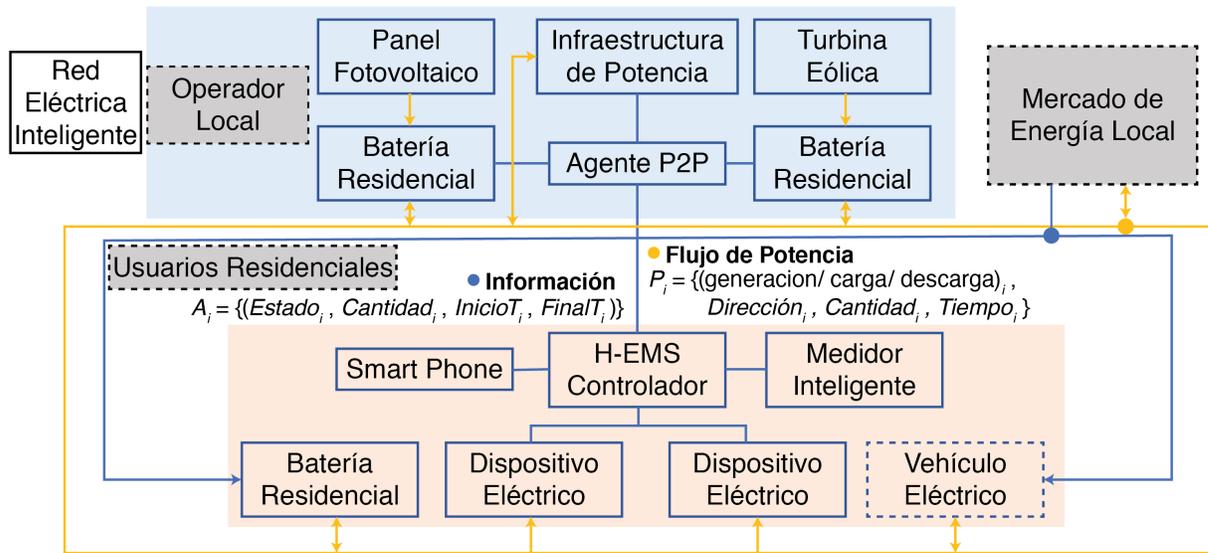


Figura 3.6: Esquema operativo de la micro-red.

- **Sistema de gestión de energía**

A partir de los perfiles nodales de generación y consumo, como también de la capacidad instalada de los sistemas de almacenamiento de energía definidos individualmente para cada uno de los participantes del modelo de estudio, los sistemas de gestión de energía residenciales (HEMS) simulados en la operación del mercado tienen el objetivo de representar las estrategias privadas de cada agente considerando sus intereses particulares.

De esta forma, se determinan localmente los periodos de déficit y excedencia de energía, ponderando los suministros, asociados con la generación residencial disponible, y los consumos de energía de los aparatos eléctricos utilizados en el intervalo de tiempo definido para el algoritmo (considerando la programación inicial y posterior a la gestión de la demanda del sistema). Esto último determina la participación del agente *peer-to-peer* en la emisión de una licitación de compra de energía o una oferta de suministro a la red *blockchain*; o, por el contrario, la operación de carga o descarga del sistema de almacenamiento residencial integrado, de acuerdo con el balance horario estimado en el procedimiento.

En la Figura 3.7 se detallan las variables que determinan la operación de los sistemas de gestión energética residenciales presentes en el modelo de estudio.

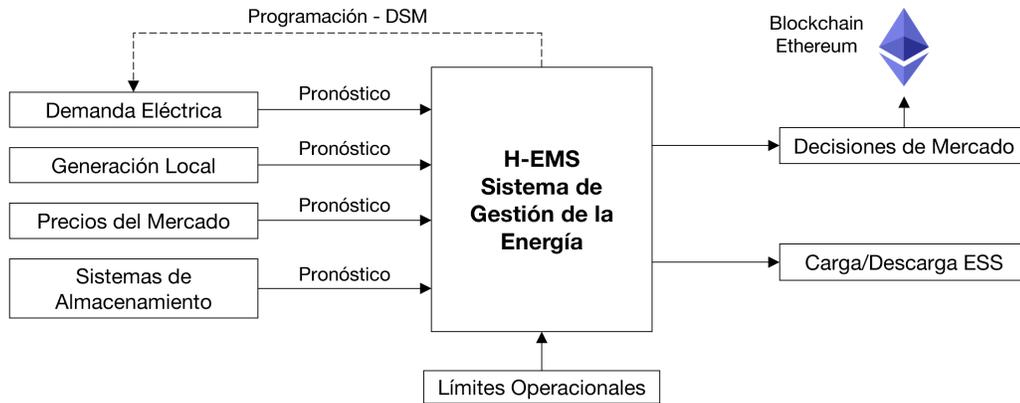


Figura 3.7: Esquema operativo del sistema de gestión de la energía residencial

Los límites operacionales que se integran en el modelo corresponden a los presentados en las Ecuaciones 3.11 – 3.12 para los sistemas de almacenamiento de energía. Por otro lado, los pronósticos que simula el esquema se asocian con un periodo futuro de 12 horas desde el instante en el cual se ejecuta el algoritmo, ponderando un factor aleatorio por la secuencia de datos de operación para incorporar un grado de error en este sistema.

Los vectores que participan en la ejecución del algoritmo corresponden al vector de consumo $x_{n,a}^t$, el vector de generación $g_{n,g}^t$ y el vector de carga/descarga $s_{n,b}^t$. De esta forma, se determina periodo de déficit de suministro cuando en un instante t , la diferencia entre el vector de generación $g_{n,g}^t$ y el vector de consumo $x_{n,a}^t$ es negativa, y un periodo de excedencia de suministro, cuando la diferencia entre el vector $g_{n,g}^t$ y $x_{n,a}^t$ es positiva.

De acuerdo a la definición previa de los estados de cada agente, un participante deficitario evalúa el suministro disponible en el sistema de almacenamiento de energía local considerando las Ecuaciones 3.11 y 3.12, desplegando una licitación de suministro en el mercado *peer-to-peer* por una cantidad determinada por los pronósticos privados de las siguientes seis horas de operación, a partir de la Ecuación 3.15.

$$b_n^{t_i} = \sum_{t=t_i}^{t+6} \left[\sum_{a=1}^{A_n} x_{n,a}^t - \sum_{g=1}^{G_n} g_{n,g}^t \right] \quad (3.15)$$

Así mismo, los agentes excedentarios evalúan sus necesidades locales durante las próximas seis horas para emitir una oferta de suministro en el mercado *peer-to-peer* con su energía excedente. En este sentido, la definición de los precios de mercado de las pujas que se despliegan en la red, corresponden al promedio de los precios observados en el mecanismo de mercado ejecutado en *blockchain*, durante el periodo de seis horas previo, en ponderación con un factor aleatorio aplicado para diversificar las ofertas, considerando un precio base de 0.09 [*USD/kWh*] y un precio límite de 0.24 [*USD/kWh*] (precio de venta de la red de distribución) [46].

Cabe mencionar que todas las licitaciones de consumo que no son asignadas por la doble subasta de precio uniforme son procesadas mediante la compra directa a la red de distribución. Así mismo, las ofertas de suministro no asignadas se procesan por medio de la carga del sistema de almacenamiento local del agente (si se cumplen las restricciones técnicas).

En la Tabla 3.9 se detalla la estructura operativa del *smart contract* diseñado, el cual es desplegado inicialmente por la cuenta de la distribuidora en el nodo *Ethereum* para ser utilizado por los agentes distribuidos, de acuerdo a las decisiones de mercado determinadas por los sistemas de gestión energética residenciales (HEMS).

Tabla 3.9: Estructura funcional del *smart contract* LEM.

Smart Contract - LEM	Mercado Local de Energía
Variables Globales	Listas públicas del contrato
1. <i>consumptionBids</i> :	Licitaciones de consumo del mercado.
2. <i>generationBids</i> :	Ofertas de suministro del mercado.
Funciones del Contrato	Funciones principales
3. <i>conBid(amount,price,timestamp)</i> :	Despliega una licitación al mercado.
4. <i>genBid(amount,price,timestamp)</i> :	Despliega una oferta al mercado.
5. <i>clearMarket()</i> :	Despeja las variables globales del mercado.
Funciones del Contrato	Funciones adicionales
6. <i>getConBid(index)</i> :	Obtiene datos de una licitación de consumo.
7. <i>getGenBid(index)</i> :	Obtiene datos de una oferta de suministro.
8. <i>deleteConBid(index)</i> :	Borra una licitación de consumo del mercado.
9. <i>deleteGenBid(index)</i> :	Borra una oferta de suministro del mercado.

3.3. Entorno de desarrollo

A partir de la investigación y exploración preliminar de los alcances del proyecto, la herramienta computacional escogida para compilar y probar las aplicaciones distribuidas definidas en el modelo de la micro-red corresponde al entorno de desarrollo *Hardhat*, el cual integra componentes orientados al diseño y gestión de procedimientos que involucran la interacción y el despliegue de *smart contracts* sobre nodos locales *Ethereum*.

La programación de las simulaciones asociadas a los protocolos y casos de estudio que abarca el proyecto, fue desarrollada en el lenguaje *JavaScript*, importando paquetes y módulos externos de *Node.js* para incorporar operaciones computacionales de mayor complejidad en las simulaciones. La ejecución de los algoritmos distribuidos integrados en el sistema (DSM y LEM) es comunicada por medio del módulo *Web3* a la red de prueba *Hardhat*, disponible localmente en el entorno de desarrollo. En este sentido, *Web3* es una colección de librerías que habilita la interacción con un nodo local de *Ethereum* usando el protocolo HTTP, permitiendo la programación del despliegue e inicialización de los *smart contracts* programados en el lenguaje *Solidity*, desde las direcciones de cuenta que dispone la red *blockchain* local de *Hardhat*.

La Figura 3.8 presenta la dinámica de despliegue e inicialización de aplicaciones distribuidas en el entorno de desarrollo *Hardhat* diseñado. Los usuarios interactúan con los contratos por medio de la API que habilita el módulo *Web3*, a partir de los binarios compilados por *Hardhat* de forma previa al despliegue de las aplicaciones, considerando que estos usuarios se encuentran asociados preliminarmente a una dirección de cuenta válida en el nodo *Ethereum* local.

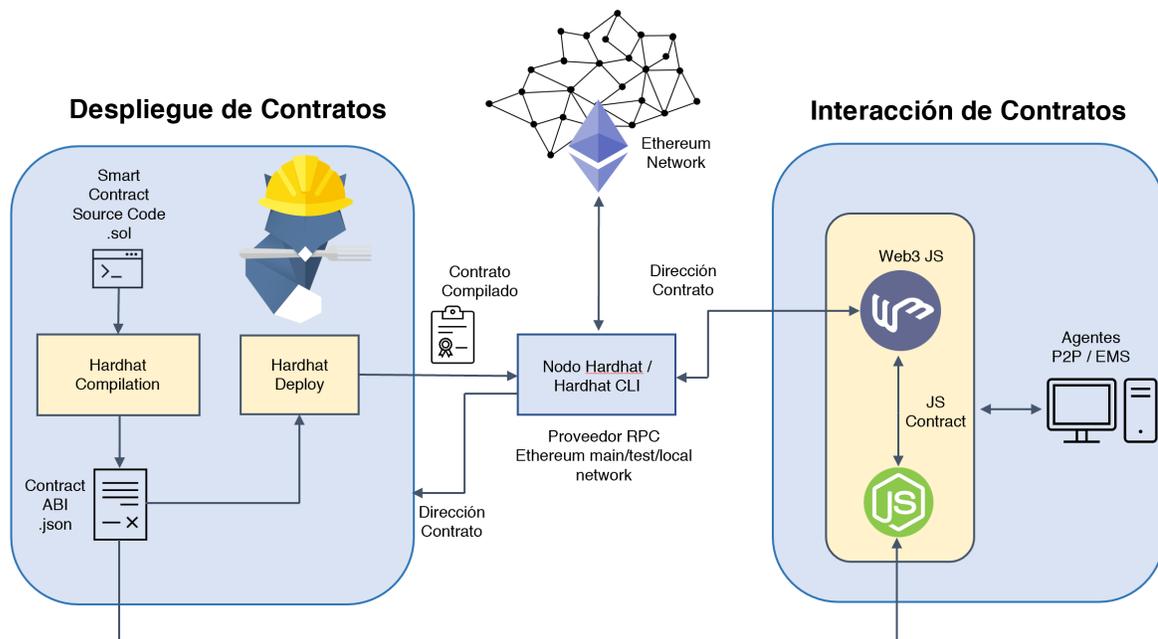


Figura 3.8: Diagrama operativo del entorno de desarrollo *Hardhat*.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

En el presente capítulo se detallan los resultados de la modelación y simulación de un entorno *blockchain* que engloba a los participantes de la micro-red de estudio definida en la metodología, aplicando los algoritmos distribuidos definidos previamente para desarrollar las aplicaciones distribuidas desplegadas en la red.

De esta forma, se presentan los resultados de la operación del protocolo de gestión de la demanda (DSM) en el cual participan los agentes por medio de un *smart contract* que permite disminuir la razón *peak-promedio* del sistema, optimizando localmente los costos de consumo de los participantes. Así mismo, se detallan los resultados de la simulación del mercado local de energía (LEM) habilitado por la plataforma *blockchain*, en la cual se ejecuta el mecanismo de mercado de doble subasta de precio uniforme para gestionar las transacciones *peer-to-peer* entre los agentes del sistema.

Ambas simulaciones tienen lugar en la misma red *blockchain*, por medio de la interacción con los *smart contracts* desplegados en la *Ethereum Virtual Machine* asociada a la red local *Hardhat* utilizando *Web3*. En este sentido, los resultados que se presentan en este capítulo están asociados con un nodo local de *Ethereum* que registra y opera las transacciones e inicializaciones de cada contrato, a partir de la simulación de las interacciones de los participantes de la micro-red de prueba.

Para detallar las aplicaciones descentralizadas diseñadas, el presente capítulo se divide en tres simulaciones, incorporando la aplicación individual de los modelos y una simulación que integra ambos sistemas:

- Sistema de Gestión de la Demanda
- Mercado Local de Energía
- Simulación Combinada

La Tabla 4.1 detalla los parámetros generales de la simulación de cada aplicación descentralizada en función de su horizonte temporal, el tipo de inicialización del algoritmo distribuido, los participantes de la micro-red que interactúan con la aplicación, el número de ejecuciones del algoritmo distribuido en el horizonte de tiempo y el número de bloques resultantes de la simulación computacional en el nodo *Ethereum* local.

Tabla 4.1: Parámetros de las aplicaciones descentralizadas de la micro-red.

Parámetro de Simulación	Gestión de la Demanda	Mercado Local
Horizonte de Tiempo:	Diario	Semanal
Tipo de Inicialización:	Diaria	Horaria
Número de Participantes:	18	18
Número de Ejecuciones:	12	168
Número de Bloques:	228	2345

Por otra parte, para exponer los resultados de estas simulaciones se introducen preliminarmente los parámetros operacionales que participan en la ejecución de las aplicaciones desarrolladas en la plataforma *blockchain Ethereum* que engloba al modelo de la micro-red de estudio, determinando los índices resultantes del rendimiento computacional de los algoritmos distribuidos en función de los costos operativos de la aplicación y las interacciones con los *smart contracts* desplegados en el nodo local.

Los costos operativos de las aplicaciones descentralizadas detalladas en el presente capítulo se relacionan con el parámetro *gas*, el cual representa una unidad de medida básica del esfuerzo computacional ejecutado para inicializar una operación en la *blockchain Ethereum*. En este sentido, los costos de *gas* en los cuales incurren los usuarios de la micro-red se asocian directamente con la complejidad de las operaciones ejecutadas en el registro distribuido, por lo que acciones como el despliegue de un nuevo *smart contract* con funciones de registro internas al nodo *Ethereum* local constituye un mayor costo de *gas* que la inicialización de una de las funciones de dicho contrato.

Una vez determinados los costos operativos de los esquemas distribuidos desarrollados en el entorno *blockchain*, las siguientes secciones del presente capítulo anexan los resultados de las simulaciones computacionales realizadas en la plataforma de registro distribuido que engloba los modelos teóricos definidos en la metodología, considerando el diseño y la implementación computacional de las interacciones entre los grupos definidos para la micro-red de estudio en torno a las aplicaciones de mercado local de energía (LEM) y gestión de la demanda energética (DSM) del sistema.

4.1. Sistema de Gestión de la Demanda

A partir de la implementación del protocolo distribuido de gestión de la demanda habilitado por medio de la red *blockchain* que engloba las interacciones entre los participantes de la micro-red de estudio, esta sección presenta los resultados asociados a la simulación del esquema descentralizado de optimización basado en el juego no cooperativo ejecutado entre los usuarios *peer-to-peer* del sistema y la distribuidora.

4.1.1. Costos operativos

En la Tabla 4.2 se presentan los costos operativos asociados a la simulación de los algoritmos de cada terminal de la micro-red en el entorno *Hardhat*. En este sentido, se detalla el costo de despliegue del *smart contract* desde la dirección de la cuenta de la distribuidora, la cual opera como el terminal agregador de la red, y los costos de adición de los bloques subsecuentes en cada iteración del protocolo distribuido por parte de los consumidores que participan en el sistema.

Tabla 4.2: Costos operativos del sistema de gestión de la demanda.

Contrato DSM	
Despliegue del Contrato:	Terminal de la Distribuidora
Gas Utilizado:	943,304 [<i>gas</i>]
Costo por Transacción:	0.019 [<i>ETH</i>]
Inicialización del Algoritmo 1:	Terminal de la Distribuidora
Transacciones por Iteración:	1
Gas Promedio por Transacción:	98,260 [<i>gas</i>]
Costo Promedio por Transacción:	0.002 [<i>ETH</i>]
Inicialización del Algoritmo 2:	Terminales de los Consumidores
Transacciones por Iteración:	18
Gas Promedio por Transacción:	98,248 [<i>gas</i> /consumidor]
Costo Promedio por Transacción:	0.002 [<i>ETH</i> /consumidor]
Iteración del Protocolo:	Blockchain / Micro-red
Transacciones por Iteración:	19
Gas Promedio por Iteración:	1,866,724 [<i>gas</i>]
Costo Promedio por Iteración:	0.037 [<i>ETH</i>]

Considerando la metodología presentada para la implementación del esquema distribuido, el despliegue del *smart contract* en la red *blockchain* solo se efectúa una única vez desde la dirección de cuenta de la distribuidora, de forma preliminar a la inicialización de los algoritmos. En cada iteración del protocolo, los agentes incurren en costos de transacción exclusivamente al distribuir información en la red. La información transmitida corresponde a la demanda agregada L_t desde el terminal de la distribuidora, y las demandas horarias residenciales l_n^t desde el terminal de los consumidores.

4.1.2. Desplazamientos de carga

En función de los perfiles de generación, demanda y flexibilidad, definidos por tipo de residencia y grupo de consumo, se anexan los resultados del protocolo diario de gestión de la demanda, tomando como escenario base al primer día de simulación del mercado local de energía de la micro-red de prueba.

De esta forma, la presente sección detalla los resultados de las programaciones de consumo optimizadas mediadas por el *smart contract* diseñado para comunicar los vectores horarios de carga de los consumidores y el vector agregado de demanda del sistema.

La Figura 4.1 presenta los resultados de la simulación del sistema de gestión de la demanda, detallando el perfil agregado de los consumos horarios relativos a los agentes que componen la micro-red. En este sentido, se adjunta el escenario base (primer vector de demanda agregada L_t calculado por el agregador) y el escenario optimizado por la aplicación distribuida ejecutada en el entorno *blockchain*.

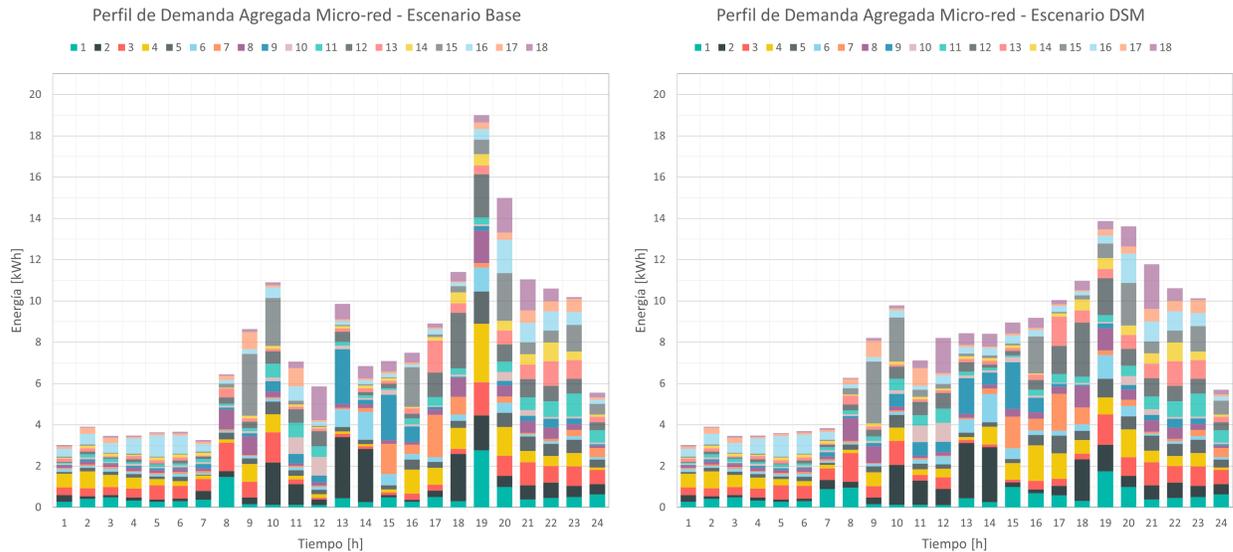


Figura 4.1: Resultados del sistema de gestión de la demanda.

En la Figura 4.1 se detalla la disminución del índice *peak-promedio* del sistema, a partir de las iteraciones del algoritmo distribuido que gestiona las programaciones de consumos de los usuarios, desplazando las cargas agregadas desde las horas de mayor concentración de demanda (hora 19 del escenario base) hacia la demanda valle del sistema. En este sentido, si bien el *peak* de la demanda se mantiene en la misma hora, el consumo asociado a dicho periodo disminuye hasta los 14 [kWh].

La Figura 4.2 presenta el resultado del protocolo de gestión de la demanda que agrupa a los cuatro primeros *prosumidores* de la micro-red definidos por la Tabla 3.1, los cuales incorporan una capacidad de almacenamiento de 6 [kWh] y una mayor flexibilidad horaria de programación (menores constantes $w_{n,a}$ de los dispositivos), representando residencias familiares en función de los perfiles de consumo privados y la disposición de desplazamiento de carga para cada aparato eléctrico programado.

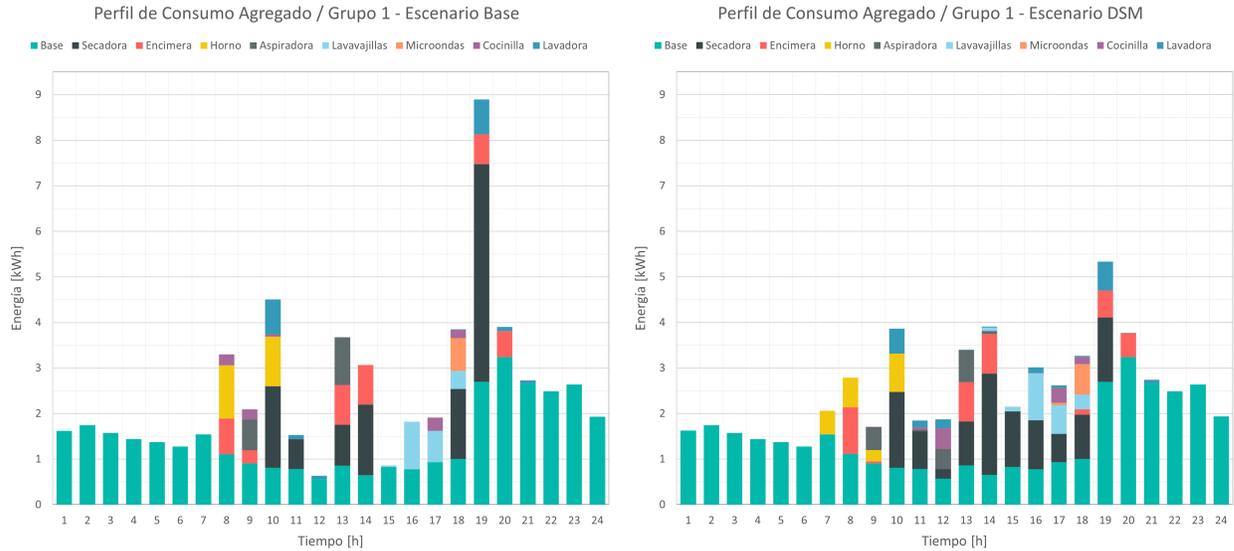


Figura 4.2: Desplazamientos de carga – Grupo 1.

El resultado obtenido para este grupo muestra el desplazamiento de carga desde el *peak* de demanda (ubicado en la hora 19), hacia las horas de menor consumo agregado para el día de prueba (excluyendo las horas de madrugada), de acuerdo a los índices de disconformidad asociados a cada dispositivo eléctrico que se integra en la optimización local de costos.

Cabe mencionar que la programación de los dispositivos integrados en el sistema de gestión de la demanda considera la factibilidad horaria de los desplazamientos de carga, detallada en la creación de los perfiles de consumo de los usuarios y definidas por las Ecuaciones 3.9 y 3.10, por lo que se restringe la programación resultante a horarios plausibles de operación (a partir de la hora 7).

Así mismo, la Figura 4.2 detalla el comportamiento de los dispositivos en función de la flexibilidad de programación del grupo, en donde aparatos eléctricos como secadoras de ropa fueron en gran medida re-programadas para cubrir la demanda valle de la operación optimizada. Por el contrario, los dispositivos eléctricos con mayores tasas de disconformidad $w_{n,a}$ y horarios de uso restrictivos, como microondas y encimeras, mantuvieron la programación inicial emitida por los agentes, con leves variaciones en la concentración horaria de los consumos energéticos predefinidos.

Por otra parte, las Figuras 4.3 y 4.4 presentan los perfiles de demanda agregada resultantes para el segundo y tercer grupo de participantes del esquema respectivamente. Ambos grupos se encuentran compuestos por seis *prosumidores* que integran generación local y sistemas de almacenamiento de energía de 3 [kWh] por agente, representando perfiles nodales de consumo asociados a residencias de dos habitantes, con menores índices de flexibilidad horaria y mayores índices de disconformidad por desplazamiento de carga en comparación con el primer grupo.

En primer lugar, la Figura 4.3 presenta los resultados del protocolo de gestión de la demanda para el segundo grupo de *prosumidores*.

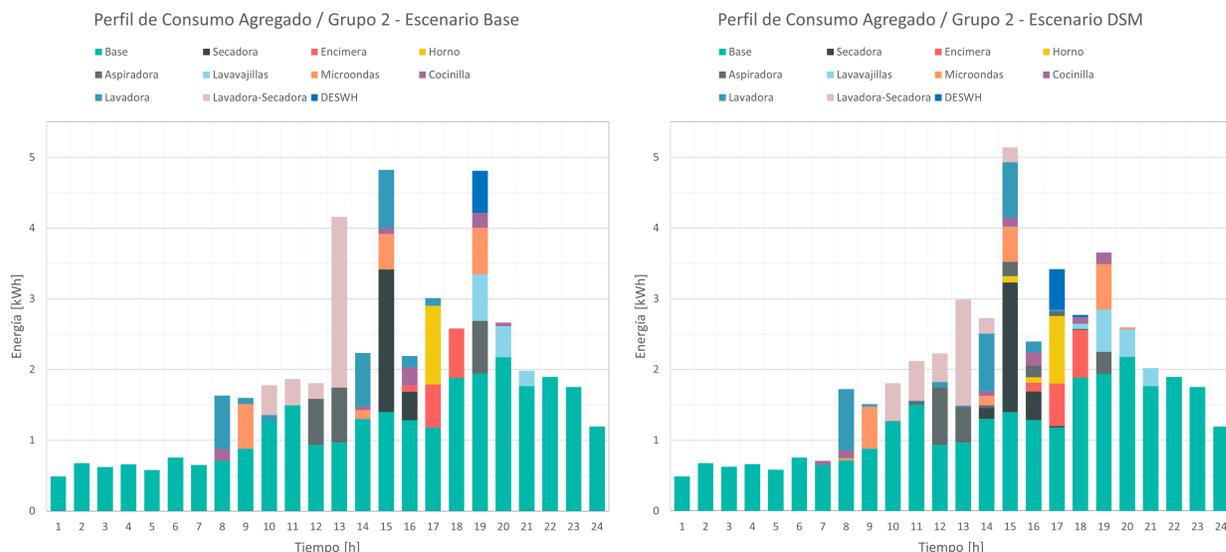


Figura 4.3: Desplazamientos de carga – Grupo 2.

A partir de los resultados que muestra la Figura 4.3, se observa un desplazamiento de la carga concentrada en la hora *peak* del sistema (hora 19) en el escenario base hacia horarios de menor concentración de consumos energéticos. De esta forma, el desplazamiento de carga del grupo define un nuevo *peak* local en la hora 15 del día de simulación, lo cual se encuentra justificado en función de la reducción de la razón *peak-promedio* sistémica que desarrolla el algoritmo distribuido, la cual no se relaciona directamente con una reducción del PAR grupal o local de los consumidores que participan en el esquema.

De forma similar a los resultados obtenidos para el primer grupo de *prosumidores* (detallado en la Figura 4.2), los dispositivos eléctricos como microondas o encimeras mantuvieron su programación inicial de acuerdo con horarios estrictos de aplicación y mayores costos de disconformidad de desplazamiento de carga. Por otro lado, un caso particular de programación sucede con el dispositivo DESWH (*Domestic Electrical Storage Water Heater*), el cual fue programado con una baja disconformidad de desplazamiento de carga pero con un horario estricto de uso, siendo completamente reasignado por el algoritmo a la hora 17.

Por otro lado, la Figura 4.4 detalla los resultados del tercer grupo de *prosumidores* de la micro-red, el cual se asocia a perfiles nodales con programaciones de consumo comparativamente mas restrictivas que las definidas para el primer y segundo grupo de usuarios del sistema. Estos resultados presentan menores diferencias de programación que los detallados para los dos primeros grupos en las Figuras 4.2 y 4.3, lo cual es justificado por una mayor asignación de costos de disconformidad en la gestión iterativa del esquema.

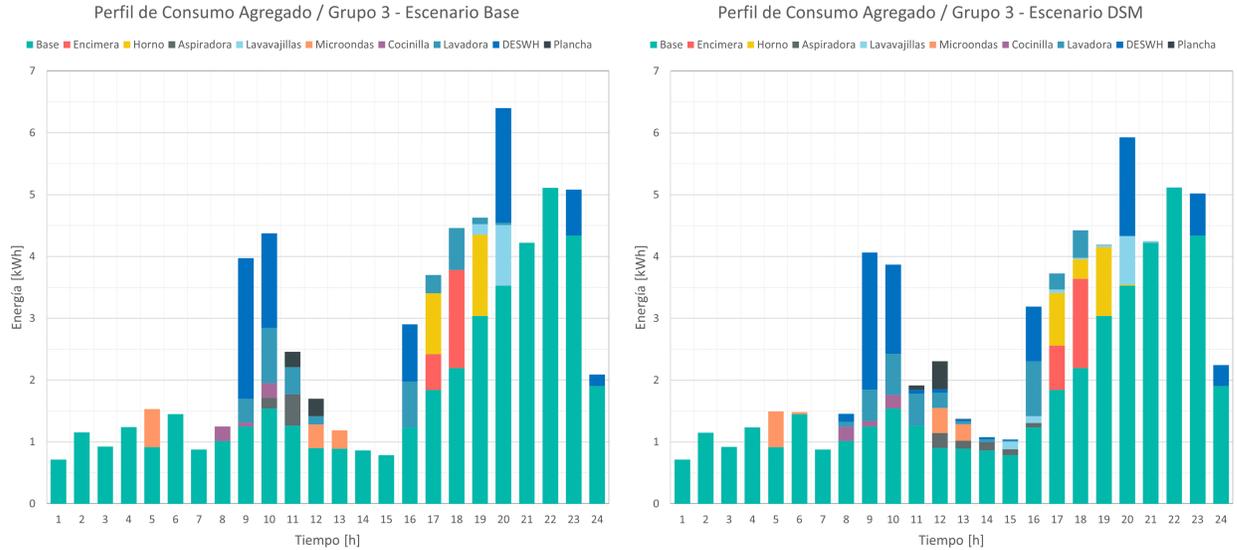


Figura 4.4: Desplazamientos de carga – Grupo 3.

Por último, la Figura 4.5 presenta los resultados asociados al cuarto grupo de la micro-red. En este caso se detalla una redistribución de la carga asociada al horno, desplazando una fracción del consumo total hacia una hora de menor demanda agregada del sistema.

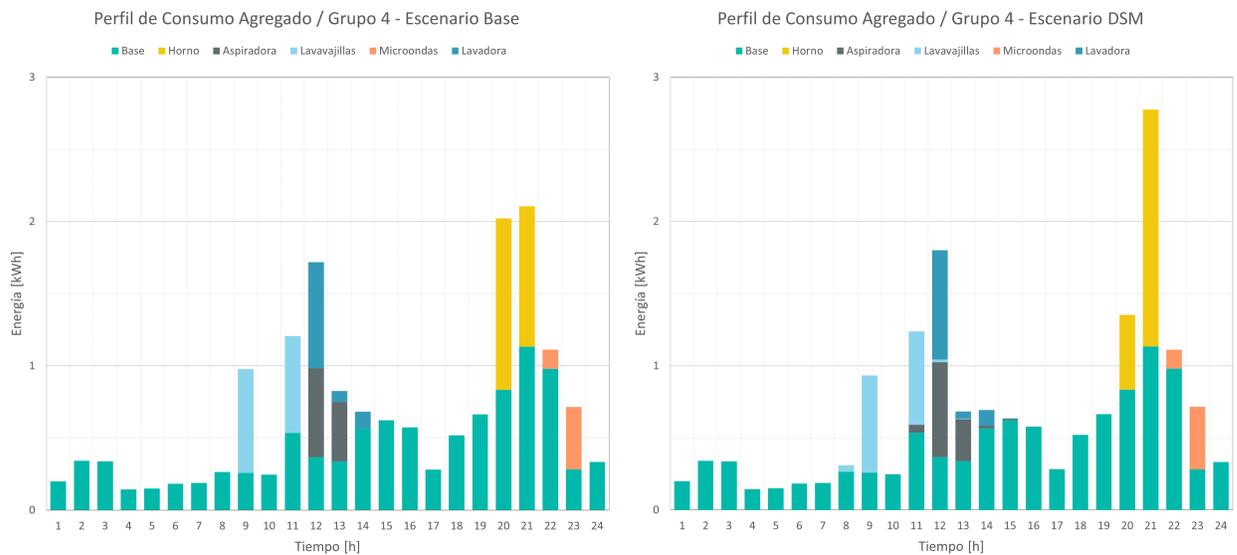


Figura 4.5: Desplazamientos de carga – Grupo 4.

De acuerdo con los resultados presentados por las Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5, para los cuatro grupos que componen el sistema, la Figura 4.6 detalla los ahorros determinados por el esquema de gestión de la demanda a partir de la función objetivo de los agentes definida en la Ecuación 3.14 de la metodología de diseño del protocolo.

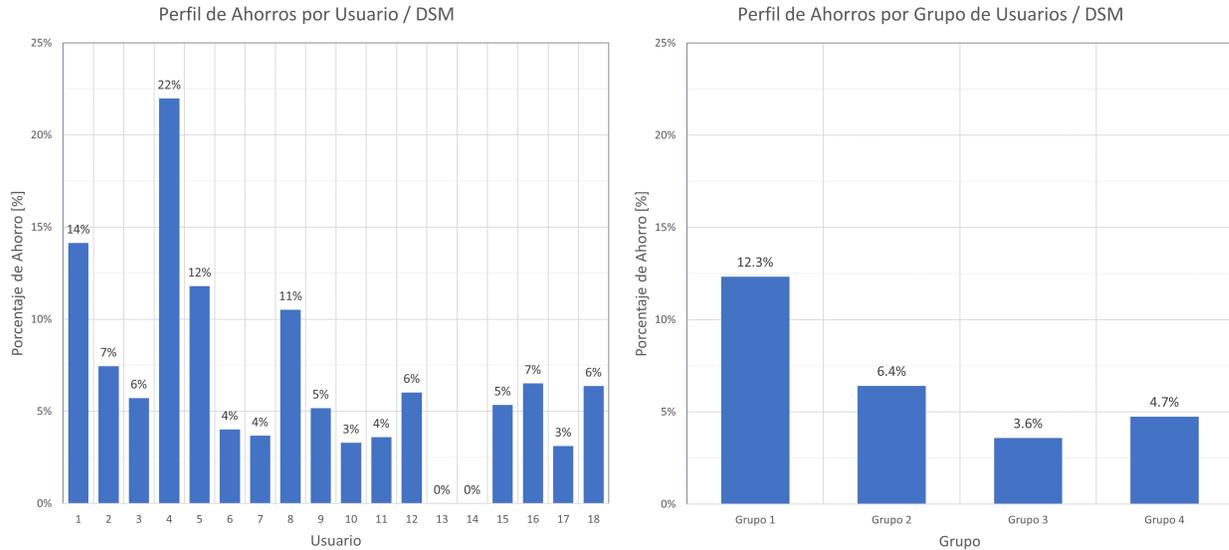


Figura 4.6: Perfil de ahorro, sistema de gestión de la demanda.

Los resultados presentan los ahorros porcentuales representativos de cada participante de acuerdo a las optimizaciones locales de las funciones definidas por la Ecuación 3.14, considerando las diferencias de costos entre las programaciones iniciales y las programaciones finales del esquema (iteración 12). En este sentido, la aplicación del protocolo de gestión de la demanda penaliza los consumos agregados del modelo por medio de la función cuadrática de precios definida en la Ecuación 3.5, incorporando un mayor nivel de ahorro a los usuarios con disponibilidad de desplazamiento de carga desde los horarios que perciben un alto consumo agregado.

De esta forma, los resultados presentados detallan un mayor porcentaje de ahorro para los usuarios del primer grupo, los cuales representaban agentes con mayor disposición de desplazamiento de carga y nivel de consumos, alcanzando un ahorro porcentual promedio del 12.3%. Por otro lado, el menor porcentaje de ahorro promedio corresponde al del tercer grupo de usuarios, en donde dos participantes no percibieron ahorros por medio del protocolo de gestión de la demanda, esto último debido a que sus programaciones iniciales no fueron alteradas en la ejecución del algoritmo distribuido dada la menor flexibilidad de programación de sus consumos privados.

4.1.3. Rendimiento del sistema

A partir de los resultados detallados por la Figura 4.1 para el protocolo distribuido de gestión de la demanda en la micro-red de estudio, la presente sección integra un resumen del rendimiento del esquema modelado en el entorno *blockchain* que engloba a los perfiles de flexibilidad y consumo de los cuatro grupos presentados por las Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5.

El protocolo de gestión de la demanda se asocia directamente con las transacciones que son ejecutadas en la plataforma *blockchain* de la simulación, a partir de la interacción entre los terminales de los consumidores y el terminal del agregador, por medio de la iteración de los algoritmos definidos para cada agente en la Tabla 3.7, utilizando un *smart contract* desplegado en el nodo *Ethereum* local que permite almacenar los vectores de demanda horaria de los consumidores y calcular el vector de demanda agregada L_t del sistema.

En este sentido, la Figura 4.7 muestra la evolución del índice PAR (razón *peak-promedio*) de la micro-red en función del número de iteraciones ejecutadas por el esquema distribuido de gestión de la demanda, incluyendo el perfil de reducción porcentual respectivo, el cual alcanza un 27 % en la doceava iteración del algoritmo (perfil optimizado de demanda agregada presentado en la Figura 4.1).

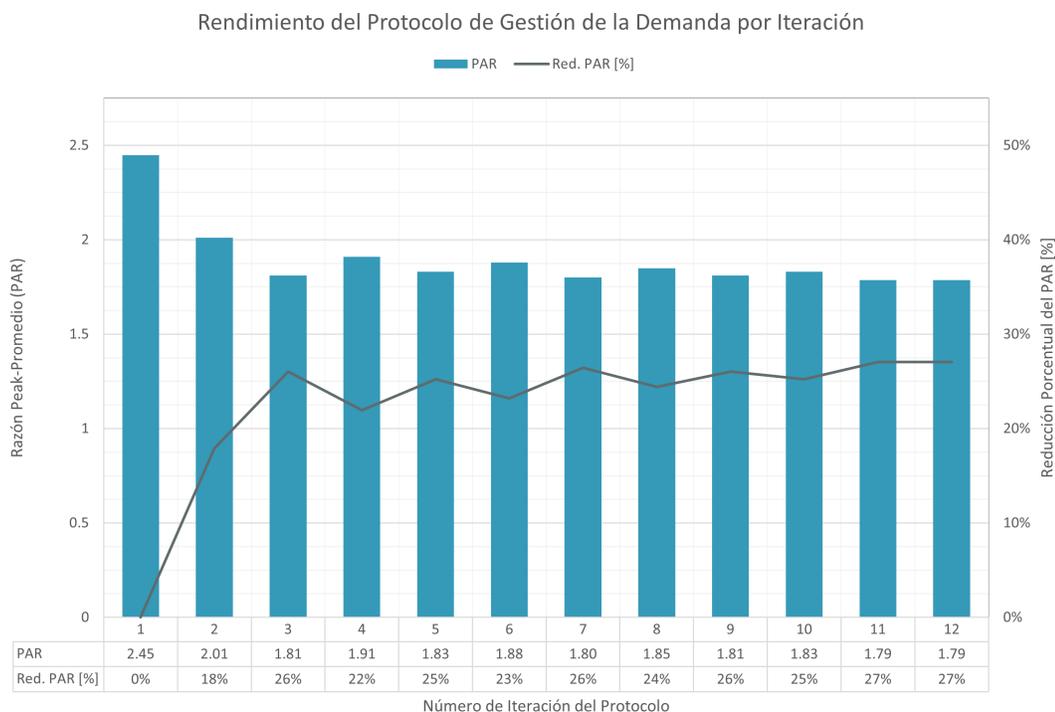


Figura 4.7: Evolución de la razón *peak-promedio* del sistema.

En función de estos resultados, la demanda *peak* L_{peak} del sistema pasa de representar inicialmente un valor de 19 [kWh] de consumos individuales agregados, a un valor de 13.8 [kWh] posterior al esquema de gestión de la demanda, lo cual representa una reducción porcentual del 27 % en la carga neta asociada a la hora 19.

4.2. Mercado Local de Energía

A partir de la metodología definida en el tercer capítulo para el desarrollo de un entorno de transacciones *peer-to-peer* de energía en la red *blockchain*, la presente sección detalla los resultados de la simulación del mercado local de energía (LEM) de la micro-red de estudio durante el periodo de una semana. Además, se presentan las interacciones con el *smart contract* diseñado para almacenar y gestionar las variables que integra el mecanismo de mercado horario de doble subasta de precio uniforme.

4.2.1. Costos operativos

La Tabla 4.3 detalla los costos operativos del *smart contract* diseñado para operar el mercado local de energía desplegado en la red *blockchain*. En este sentido, se presentan los costos asociados al despliegue del *smart contract*, los costos de las transacciones *peer-to-peer* entre usuarios, los costos de participación en el mecanismo de mercado y los costos de despeje de precio uniforme de la subasta.

Tabla 4.3: Costos operativos del mercado local de energía.

Contrato LEM	
Despliegue del Contrato:	Terminal de la Distribuidora
Gas Utilizado:	723,937 [<i>gas</i>]
Costo por Transacción:	0.014 [<i>ETH</i>]
Compraventa de Energía:	Terminal de los Prosumidores
Gas Promedio por Transacción:	21,000 [<i>gas</i>]
Costo Promedio por Transacción:	0.0004 [<i>ETH</i>]
Doble Subasta de Energía:	Terminal de los Prosumidores
Gas Promedio por Transacción:	96,063 [<i>gas</i>]
Costo Promedio por Transacción:	0.002 [<i>ETH</i>]
Despeje del Mercado:	Terminal de la Distribuidora
Gas Promedio por Transacción:	185,981 [<i>gas</i>]
Costo Promedio por Transacción:	0.004 [<i>ETH</i>]

Al igual que con el sistema de gestión de la demanda, el costo de despliegue del *smart contract* que habilita el mercado local de energía solo procede una única vez desde la cuenta del operador del sistema (terminal de la distribuidora).

El numero de bloques totales que anexa el registro distribuido en la simulación semanal del mercado local de energía corresponde a 2345 bloques (sin considerar el bloque de despliegue del *smart contract* LEM).

4.2.2. Operación del sistema

A continuación, se presentan los resultados de la simulación semanal del mercado local de energía mediado por el mecanismo de doble subasta de precio uniforme desplegado en la red *blockchain* del sistema.

La simulación del presente esquema se desarrolla a partir de la interacción de los usuarios con las funcionalidades internas del *smart contract* desplegado de forma previa por el nodo operador del sistema, gestionando la aplicación del mecanismo de mercado que cruza las licitaciones de consumo con las ofertas de venta de energía registradas en la cadena de bloques.

La ejecución de las funciones integradas en el *smart contract* que se almacena en el nodo local *Ethereum* se realiza por medio de la API *Web3*, permitiendo comunicar las direcciones de cuenta que provee el entorno de desarrollo *Hardhat* con los binarios de las aplicaciones, programadas en el lenguaje *Solidity*.

De esta forma, la presente simulación semanal resulta en una incorporación de 2346 bloques en la *blockchain* del sistema (incluyendo el bloque de despliegue del contrato), los cuales corresponden a las múltiples interacciones e inicializaciones de las funciones del contrato desplegado en la plataforma.

La Figura 4.8 presenta el resultado de la simulación semanal ejecutada sobre el modelo de mercado local de energía habilitado por la plataforma *blockchain*. En este sentido, se detallan los perfiles de generación agregada, los consumos totales del sistema, la gestión de los sistemas de almacenamiento, la energía transada en el mercado *peer-to-peer* y la energía comprada a la red de distribución en los casos de déficit energético de los nodos.

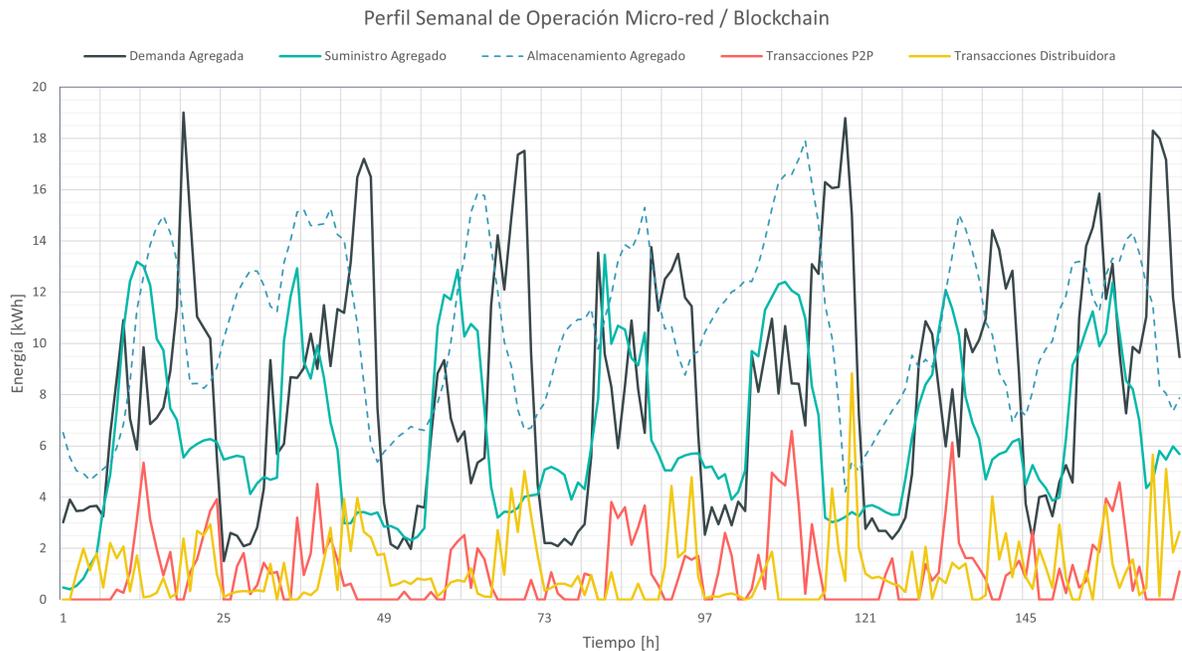


Figura 4.8: Perfil de operación semanal del mercado local de energía.

Respecto al mercado *peer-to-peer* detallado en la Figura 4.8, se observan mayores volúmenes de energía durante las horas de excedencia de los agentes que incorporan instalaciones solares en el sistema. Así mismo, los usuarios que integran generación eólica participan en el suministro de los consumos asociados a las horas de la madrugada, presentándose volúmenes de energía después de la demanda *peak* de los días detallados en el gráfico. Por otra parte, la energía suministrada por la red de distribución del sistema se concentra en las horas de la noche, a medida que el perfil de generación solar residencial disminuye y la generación eólica instalada no es capaz de suministrar los consumos requeridos por la micro-red.

En este sentido, las Figuras 4.9 y 4.10 detallan los volúmenes de energía horarios y el número de transacciones de cada segmento del mercado en función del promedio entre los días que incorpora la simulación.

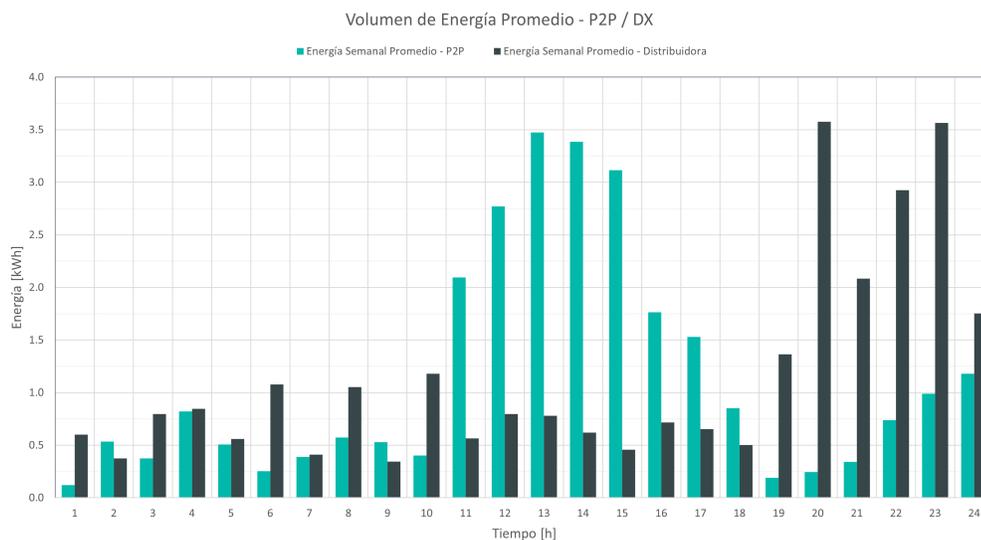


Figura 4.9: Volumen de energía promedio horario, simulación semanal.

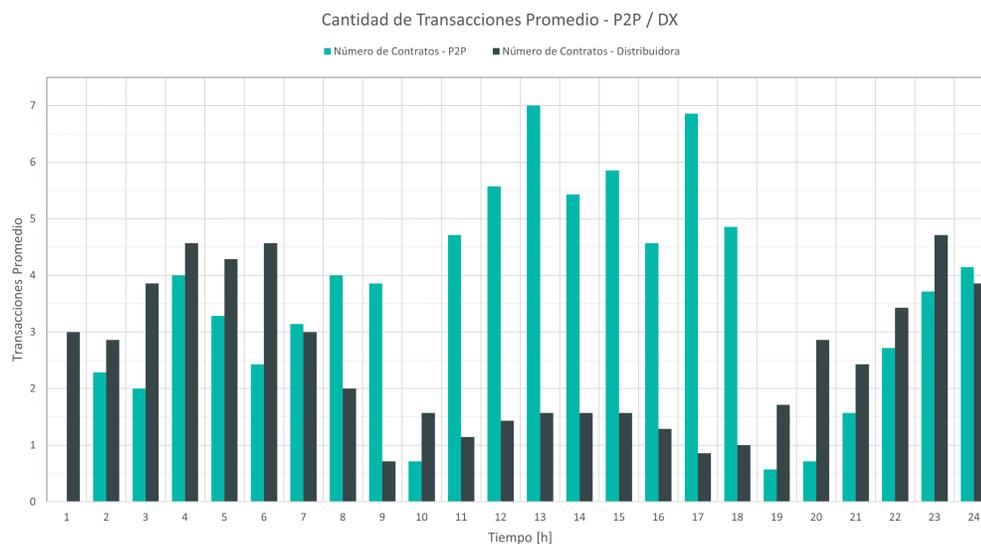


Figura 4.10: Transacciones de energía promedio horario, simulación semanal.

La Figura 4.11 presenta las interacciones promedio horarias con el mecanismo de doble subasta de precio uniforme desplegado en *blockchain*.

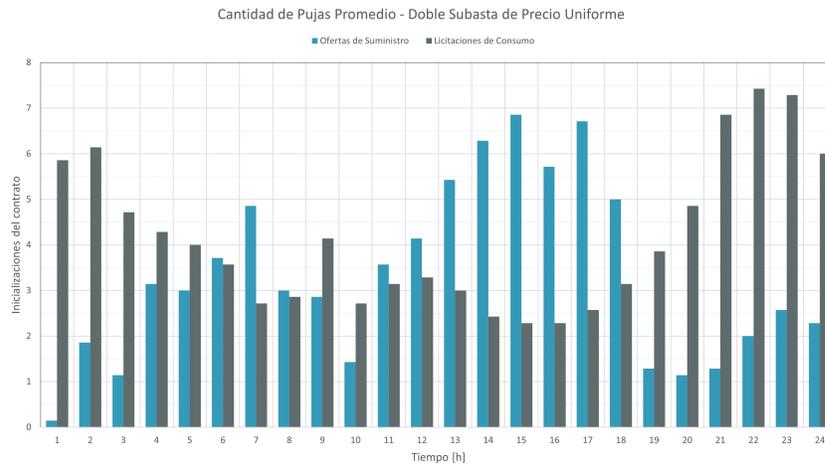


Figura 4.11: Perfil de interacción promedio con el mecanismo de mercado.

La Figura 4.12 detalla el perfil semanal de precios de despeje del mercado *peer-to-peer*. En el caso de no existir una mínima cantidad de licitaciones u ofertas de suministro energético, el contrato no puede efectuar el cruce de la oferta y la demanda disponible, provocando discontinuidades que son asignadas al precio de venta de la red de distribución.

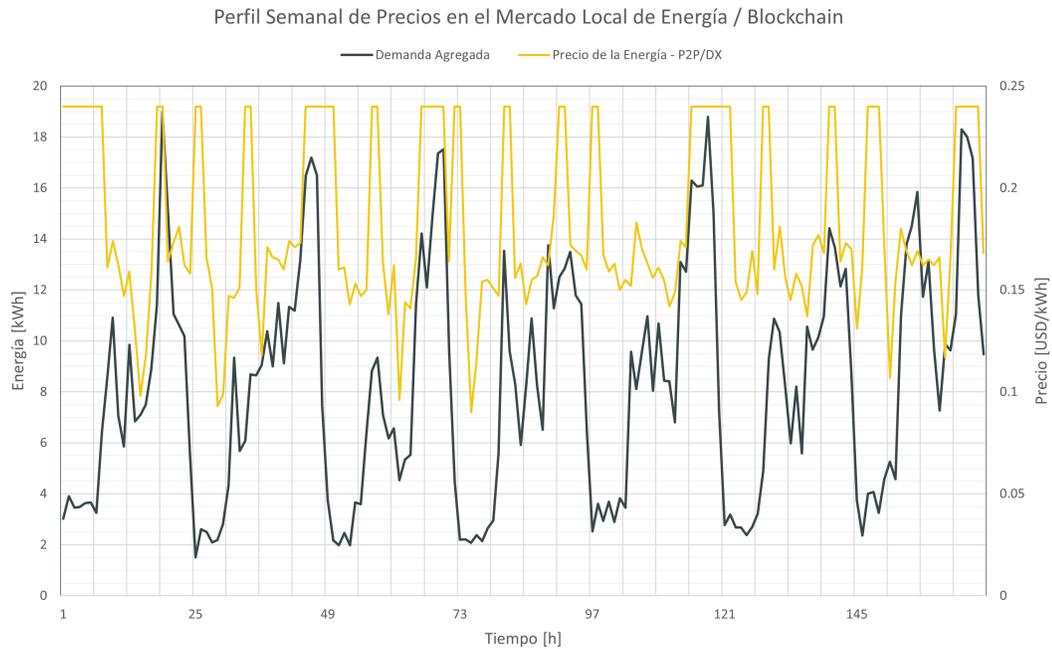


Figura 4.12: Perfil de precios de despeje de la doble subasta.

La curva de precios de despeje del mercado se aproxima a la curva de demanda agregada debido a que al existir múltiples licitaciones de suministro de energía en la plataforma, el mecanismo asigna un mayor precio uniforme de venta en función del cruce entre las curvas de oferta y demanda de la simulación.

Tabla 4.4: Precio promedio semanal de la energía en el mercado.

Métrica semanal de operación	Escenario	Valor	Unidad
Precio Promedio de la Energía	Base	0.24	[USD/kWh]
Precio Promedio de la Energía	Base & Mercado P2P	0.18	[USD/kWh]
Reducción Porcentual		25	[$\%$]
Precio Promedio de la Energía	Mercado P2P	0.15	[USD/kWh]
Reducción Porcentual		37.5	[$\%$]

La Tabla 4.4 detalla el precio promedio de la energía en el mercado local del sistema habilitado por *blockchain*, el cual corresponde a 0.18 [USD/kWh] considerando los contratos efectuados entre nodos *prosumidores*, y entre consumidores y la red de distribución. Además, se incorpora el precio promedio semanal del mercado *peer-to-peer* mediado por el mecanismo de doble subasta de precio uniforme, el cual corresponde a un valor de 0.15 [USD/kWh], alcanzando una reducción porcentual 37.5% respecto al escenario base del modelo.

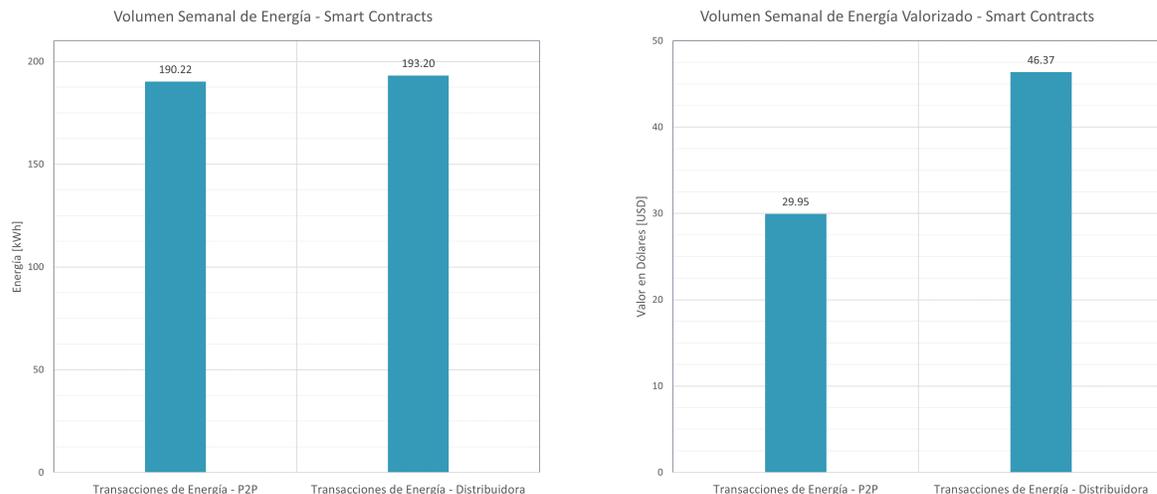


Figura 4.13: Volúmenes de energía trazados por la plataforma *blockchain*

La Figura 4.13 detalla los resultados agregados obtenidos de la simulación semanal del mercado local de energía, de acuerdo a las transacciones de energía ejecutadas en la plataforma *peer-to-peer* del modelo y las transacciones efectuadas con la red de distribución.

En este sentido, en ambos mercados se trazaron volúmenes de energía similares considerando el periodo de simulación completo, pero en función del mercado *peer-to-peer* habilitado por la plataforma *blockchain* del sistema, la energía valorizada localmente en la micro-red llega en total a los 29.95 [USD], lo cual representa una reducción porcentual del 35%.

De esta forma, a nivel sistémico se percibe un ahorro total de 45 [USD], sin considerar los costos asociados al *gas* utilizado por las múltiples funciones del contrato. Al considerar estos costos operativos en el balance del sistema, el ahorro sistémico desciende a 21 [USD] por la operación semanal del mercado local de energía en la micro-red.

4.3. Simulación Combinada

En la presente sección se detallan los resultados de la simulación del mercado local de energía (LEM) implementado en *blockchain* para la micro-red de prueba considerando la operación simultánea del esquema distribuido de gestión de la demanda (DSM). De esta forma, se despliegan ambos *smart contracts* en el nodo *Ethereum* local, permitiendo la interacción con las funciones diseñadas para gestionar los algoritmos integrados en ambas aplicaciones, simulando un ambiente de transacciones de energía en el cual se realiza una programación diaria de los consumos nodales para reducir el índice PAR agregado del sistema.

De esta forma, secuencialmente se desarrolla con anticipación la optimización de los consumos asociada al sistema de gestión de demanda, considerando un periodo de tiempo en el cual se ejecuta la iteración de los algoritmos hasta la convergencia del esquema (el día previo al programado), luego se realiza la operación diaria del mercado local de energía, de acuerdo con las programaciones obtenidas por medio del DSM, en la cual se ejecutan los algoritmos horarios de doble subasta con precio uniforme, habilitados por el *smart contract* desplegado en la red *blockchain*.

La Figura 4.14 presenta los perfiles de demanda y suministro agregado del primer día de simulación del mercado local de energía, considerando los escenarios que representan la operación base de la micro-red, y la operación conjunta con el protocolo distribuido de gestión de demanda. Además se integran los volúmenes de energía tranzados de forma *peer-to-peer* entre los agentes que presentan excedentes de energía y los que poseen déficit de suministro, como también los volúmenes de energía comprados a la distribuidora, definidos por los casos en los que no se presentan oferentes de energía en el mercado local, o no es factible calcular el precio uniforme de la subasta por medio del *smart contract* implementado.

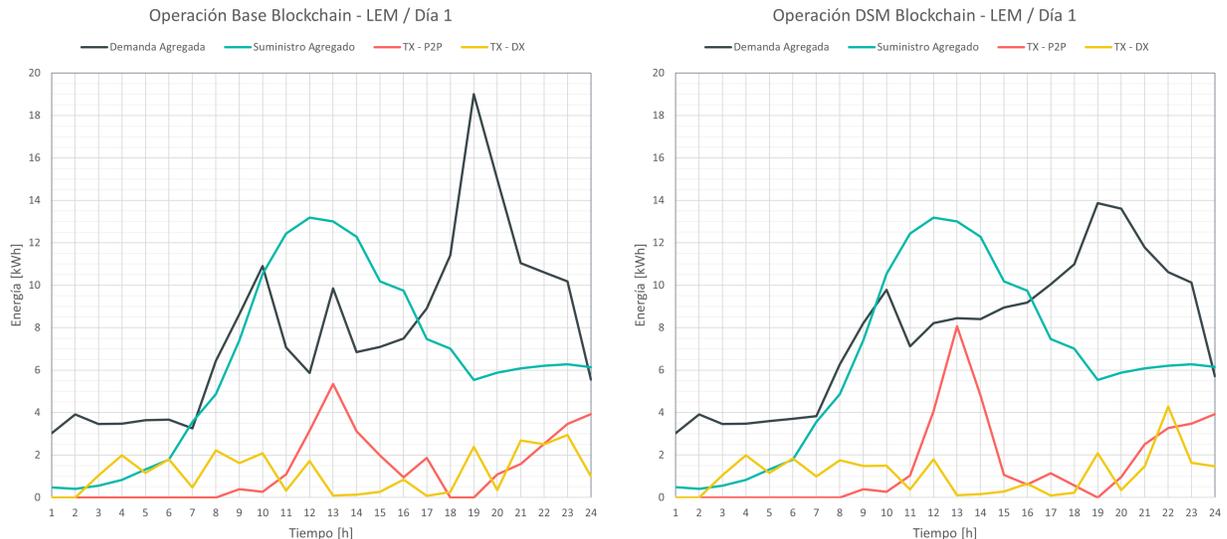


Figura 4.14: Operación del mercado local de energía en los escenarios base y con gestión de la demanda.

En la Figura 4.14 se puede observar un aumento en el volumen de energía transado en el mercado *peer-to-peer*, asociado al nivel de excedencia presente en el horario valle de la demanda del sistema. De esta forma, el desplazamiento de las cargas de los consumidores hacia la demanda valle del sistema incentiva el mercado local en función de la generación solar que se subasta en el mecanismo de mercado que ejecuta el *smart contract* desplegado.

Por otro lado, la Figura 4.15 detalla el número de contratos trazados por la plataforma *blockchain* de la micro-red entre las direcciones de cuenta de los nodos *prosumidores*, que gestionan intercambios *peer-to-peer* de energía mediados por el mercado de subastas del contrato desplegado, y transacciones hacia la dirección de la cuenta que pertenece a la distribuidora, la cual vende la energía solicitada por los usuarios deficitarios que no perciben el suministro restante desde otro *prosumidor* del sistema.

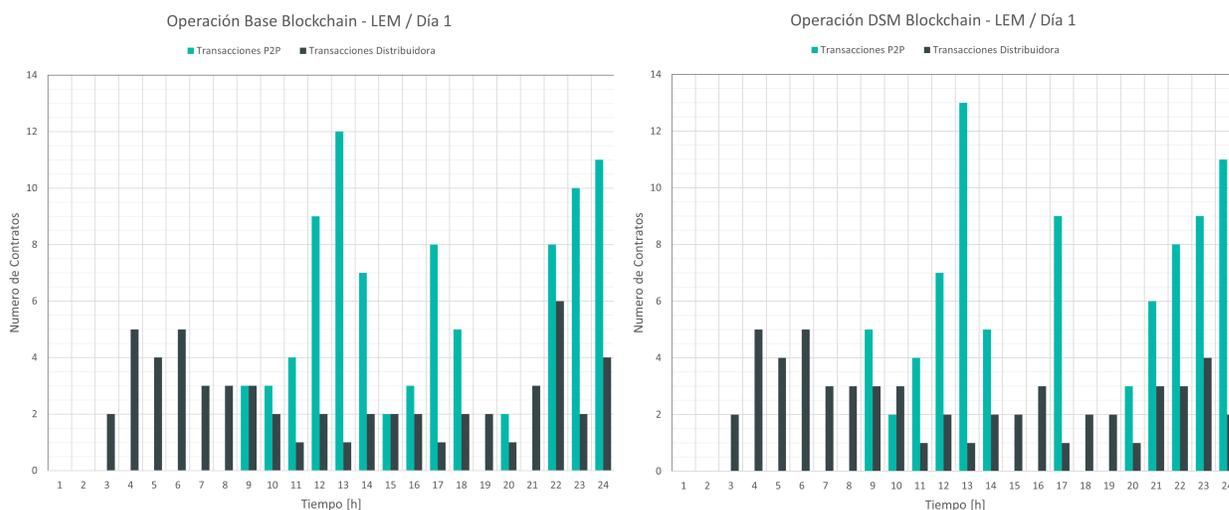


Figura 4.15: Número de transacciones horarias entre agentes del sistema.

La Tabla 4.5 detalla el sumario de transacciones realizadas en la red *blockchain* para el día de simulación del mercado local de energía optimizado por el sistema de gestión de demanda. En función de los resultados adjuntos en la tabla, se obtiene una disminución porcentual de un 7% para los costos totales asociados a la compra de energía por medio de contratos con la distribuidora.

Tabla 4.5: Volúmenes de energía, simulación combinada.

Métricas diaria de operación	Base	DSM	Unidad
Volumen de Energía Agregado - P2P	30.73	36.11	[kWh]
Volumen de Energía Agregado - DX	28.1	26.1	[kWh]
Volumen de Energía Valorizado - P2P	2.50	2.66	[USD]
Volumen de Energía Valorizado - DX	6.74	6.26	[USD]

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajo Futuro

El trabajo desarrollado por esta memoria de título permite enmarcar la investigación en la aplicación de tecnologías descentralizadas orientadas a aprovechar las arquitecturas de red presentes en los sistemas eléctricos modernos, complementando los atributos operacionales y las características de diseño que estos sistemas presentan, para incorporar esquemas participativos descentralizados capaces de integrar flexibilidad y autonomía a sistemas eléctricos como micro-redes y comunidades inteligentes.

En este sentido, la presente memoria de título implementó dos aproximaciones distribuidas de aplicación de la tecnología *blockchain*, diseñando un mercado local de energía basado en un mecanismo de doble subasta de precio uniforme, y un protocolo distribuido de gestión de la demanda que habilita el diseño de estrategias individuales de consumo por medio de optimizaciones locales para disminuir la demanda *peak* de la micro-red.

A partir de los resultados obtenidos mediante la simulación de cada uno de estos esquemas, la presente sección se divide en las dos aplicaciones que fueron desplegadas en la red, analizando los resultados obtenidos de acuerdo a los alcances de los modelos implementados para cada una de ellas. Además, se concluye respecto al modelo de *blockchain* determinado para ejecutar ambos protocolos de operación.

5.1. Conclusiones

5.1.1. Sistema de Gestión de la Demanda

Los resultados que presenta el sistema de gestión de la demanda implementado en el modelo de simulación, demuestran la efectividad del algoritmo distribuido que opera por medio de las iteraciones entre los terminales del agregador y de los consumidores de la micro-red. En este sentido, el rendimiento del protocolo determinado para el caso de estudio presenta una reducción del 27% de la razón *peak-promedio* en la doceava iteración, disminuyendo las funciones de costo de los usuarios de acuerdo a los resultados presentados en la Figura 4.6.

En función de esto último, la condición del algoritmo de consenso *Proof of Work* que opera en la *blockchain pública Ethereum* penaliza el número de iteraciones que tarda la convergencia del esquema, debido a los costos energéticos del mecanismo de criptografía utilizado. Este

aspecto debe ser considerando en la definición del criterio de convergencia del modelo para no incurrir en altos costos asociados al algoritmo PoW. En este sentido, *blockchains de consorcio* o *blockchains privadas* con acceso a otros algoritmos de consenso como el PoA evitarían la problemática del consumo energético en la operación del esquema, pero integrarían una estructura mas centralizada en la gestión y validación del modelo.

5.1.2. Mercado Local de Energía

Los resultados del mercado local de energía implementado en la plataforma *blockchain* presentan beneficios para los usuarios de la micro-red, los cuales acceden a menores precios de consumo energético en el mercado *peer-to-peer* ejecutado por una doble subasta de precio uniforme (detallados en la Tabla 4.4) respecto a las compras hacia la red de distribución. De esta forma, los resultados de la simulación del sistema detallan un ahorro sistémico de 21 [USD], considerando los costos del algoritmo de consenso, y 45 [USD] semanales sin estimar los costos incurridos en la inicialización de las funciones internas del contrato.

En este sentido, un diseño de mayor complejidad en los EMS residenciales podría ayudar a mejorar el rendimiento del esquema, evitando la participación en subastas sin precio de despeje u optimizando la gestión de los sistemas de almacenamiento locales de los participantes de la micro-red.

5.2. Trabajo Futuro

A partir del trabajo realizado en el presente proyecto de título se proponen los siguientes trabajos futuros en torno a la temática investigada y los alcances de las implementaciones computacionales desarrolladas:

- Desarrollar un esquema distribuido de gestión de la demanda que incorpore la desconexión de cargas y escenarios de restricción de suministros de la red de distribución.
- Incorporar aplicaciones distribuidas para ejecutar otros mecanismos de despeje de precios en el mercado local de energía del sistema, estudiando la eficiencia de cada mecanismo.
- Desplegar las aplicaciones distribuidas diseñadas en el presente trabajo en un entorno de desarrollo orientado a la implementación de *blockchains privadas* y *blockchains de consorcio* como *Hyperledger*.
- En función de la modificación del algoritmo de consenso de la *blockchain Ethereum* a *Proof of Stake (Ethereum 2.0)*, adaptar los algoritmos distribuidos al nuevo contexto de validación.
- Integrar una mayor complejidad en los procedimientos de optimización local definidos por la gestión de los recursos energéticos distribuidos de cada agente, incorporando restricciones y condiciones asociadas a casos críticos de operación.
- Representar la infraestructura física de la micro-red de estudio por medio de herramientas computacionales de simulación como *GridLAB-D*, estudiando el efecto de las pérdidas por las líneas de baja tensión de la micro-red.

Glosario

Ethereum Corresponde a una *blockchain* descentralizada de código abierto que integra la funcionalidad y las herramientas de desarrollo de *smart contracts*. El diseño de esta *blockchain* se basa en una red no jerárquica de computadores que incorpora algoritmos de consenso para validar los contratos ejecutados en el registro distribuido del sistema al igual que *Bitcoin*, pero a diferencia de esta, *Ethereum* introduce la criptomoneda *Ether (ETH)*, que compensa a los mineros del consenso *Proof of Work* por el trabajo computacional realizado. 4, 12, 16, 17, 22, 23, 26, 39, 42–45, 52, 54, 58, 60, 61, 68

Ethereum Virtual Machine La *Ethereum Virtual Machine* se ejecuta como una máquina de estado con profundidad de 1024 ítems, en donde cada ítem posee una palabra de 256 bits, con el objetivo de compatibilizar con la función *hash* criptográfica *SHA-256*. La función de la máquina virtual de *Ethereum* se relaciona con la gestión de los *smart contracts* de la red *blockchain*, sirviendo como entorno de ejecución de las funciones internas de los *smart contracts*, en donde mantiene una memoria transitoria de la operación ejecutada en la red, la cual no persiste entre múltiples transacciones . 62

Gas El *gas* es la unidad de medida de la *Ethereum Virtual Machine* utilizada para determinar las tarifas de las transacciones que se ejecutan en la plataforma *blockchain*, asociándose con la cantidad de *ETH* que debe pagar el ejecutor del contrato por el trabajo computacional de minería del nuevo bloque mediante el algoritmo de consenso *Proof of Work*. De esta forma, una operación de mayor complejidad sobre el registro distribuido de la red implica un mayor costo computacional de resolución del problema criptográfico y una mayor tarifa por *gas* de la inserción del nuevo bloque. 45, 57, 69

Smart Contracts Corresponden a programas informáticos capaces de ejecutar operaciones sobre los registros distribuidos presentes en una red descentralizada *blockchain Ethereum*, en función de la programación de sus funciones internas y su estado, pudiendo ser inicializado luego del despliegue de su contenido a una dirección de *Ethereum*. A diferencia de otros tipos de programas informáticos, los *smart contracts* no son controlados por un usuario específico de la red distribuida, sino que, luego del despliegue de la información y la asignación de los metadatos del binario del contrato, puede ser inicializado desde cualquier nodo del sistema para ejecutar sus funciones. 2–4, 12, 20, 22–27, 33, 38–40, 42–47, 52–54, 58, 59, 68, 69

Siglas

ADMM Alternating Direction Method of Multipliers. 25

API Application Programming Interface. 43, 54, 68

CREST Centre for Renewable Energy Systems Technology. 30–32

D-OPF Distributed Optimal Power Flow. 20, 25

DDoS Distributed Denial of Service. 14

DERs Distributed Energy Resources. 5, 8, 21, 25

DLT Distributed Ledger Technology. i, 19, 20, 26

DSM Demand Side Management. 3, 20, 26–28, 32, 38, 39, 43–46, 58, 59, 69

EMS Energy Management System. 7–9, 61

HEMS Home Energy Management System. 40–42

IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers. 5

IPM Interior Point Method. 37, 38

LEM Local Energy Market. 3, 20–22, 26–28, 42–45, 53, 58, 69

MILP Mixed Integer Linear Programming. 23

P2P Peer to Peer. 2, 57, 59

PAR Peak to Average Ratio. 23, 34, 35, 49, 52, 58

PCC Point of Common Coupling. 6

PoA Proof of Authority. 16, 61

PoS Proof of Stake. 16

PoW Proof of Work. 14, 16, 17, 61

Bibliografía

- [1] A. S. Musleh, G. Yao, and S. M. Muyeen, “Blockchain Applications in Smart Grid-Review and Frameworks,” *IEEE Access*, vol. 7, 2019.
- [2] Comisión Nacional de Energía, “Informe de Previsión de Demanda 2020-2040 Sistema Eléctrico Nacional y Sistemas Medianos,” tech. rep., 2020.
- [3] L. Mehigan, J. P. Deane, B. P. Gallachóir, and V. Bertsch, “A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems,” 2018.
- [4] E. Espe, V. Potdar, and E. Chang, “Prosumer communities and relationships in smart grids: A literature review, evolution and future directions,” 2018.
- [5] M. F. Zia, M. Benbouzid, E. Elbouchikhi, S. M. Muyeen, K. Techato, and J. M. Guerrero, “Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis,” 2020.
- [6] I. S. Bayram, M. Z. Shakir, M. Abdallah, and K. Qaraqe, “A survey on energy trading in smart grid,” in *2014 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, GlobalSIP 2014*, 2014.
- [7] S. Singh and N. Singh, “Blockchain: Future of financial and cyber security,” in *Proceedings of the 2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics, IC3I 2016*, 2016.
- [8] E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, and C. Weinhardt, “Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid,” *Applied Energy*, vol. 210, 2018.
- [9] I. Power and E. Society, *IEEE Trial-Use Guide for Smart Distribution Applications*. 2019.
- [10] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Cañizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saadifard, R. Palma-Behnke, G. A. Jiménez-Estévez, and N. D. Hatziargyriou, “Trends in microgrid control,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, 2014.
- [11] Dehua Zheng, Wei Zhang, Solomon Netsanet Alemu, Ping Wang, Girmaw Teshager Bitew, Dan Wei, and Jun Yue, “Microgrid Protection and Control,” pp. 1–12, 2021.
- [12] E. Munsing, J. Mather, and S. Moura, “Blockchains for decentralized optimization of energy resources in microgrid networks,” in *1st Annual IEEE Conference on Control Technology and Applications, CCTA 2017*, vol. 2017-January, 2017.
- [13] R. Palma-Behnke, D. Ortiz, L. Reyes, G. Jiménez-Estévez, and N. Garrido, “A social SCADA approach for a renewable based microgrid - The Huatacondo project,” in *IEEE*

Power and Energy Society General Meeting, 2011.

- [14] Z. Zheng, S. Xie, H. Dai, X. Chen, and H. Wang, “An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends,” in *Proceedings - 2017 IEEE 6th International Congress on Big Data, BigData Congress 2017*, 2017.
- [15] P. Dondi, D. Bayoumi, C. Haederli, D. Julian, and M. Suter, “Network integration of distributed power generation,” in *Journal of Power Sources*, vol. 106, 2002.
- [16] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, “Distributed generation: A definition,” *Electric Power Systems Research*, vol. 57, no. 3, 2001.
- [17] N. Hatziaargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*. 2013.
- [18] P. Palensky and D. Dietrich, “Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 3, 2011.
- [19] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, and S. Bahramirad, “State of the art in research on microgrids: A review,” 2015.
- [20] X. Li, P. Jiang, T. Chen, X. Luo, and Q. Wen, “A survey on the security of blockchain systems,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 107, 2020.
- [21] S. Aggarwal and N. Kumar, “Chapter Three - Hashes, Cryptographic primitives used in blockchain,” in *Advances in Computers* (S. Aggarwal, N. Kumar, and P. Raj, eds.), vol. 121, pp. 83–93, Elsevier, 2021.
- [22] T. Aste, P. Tasca, and T. Di Matteo, “Blockchain Technologies: The Foreseeable Impact on Society and Industry,” *Computer*, vol. 50, no. 9, 2017.
- [23] K. Christidis and M. Devetsikiotis, “Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things,” 2016.
- [24] J. Moubarak, E. Filiol, and M. Chamoun, “On blockchain security and relevant attacks,” in *2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference, MENACOMM 2018*, 2018.
- [25] M. Du, X. Ma, Z. Zhang, X. Wang, and Q. Chen, “A review on consensus algorithm of blockchain,” in *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2017*, vol. 2017-January, 2017.
- [26] M. Jakobsson and A. Juels, “Proofs of Work and Bread Pudding Protocols,” in *Secure Information Networks*, 1999.
- [27] S. Nakamoto, “Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system,” 2008.
- [28] A. Kiayias, A. Russell, and B. David, “PPCoin: Peer-to-Peer Crypto-Currency with Proof-of-Stake,” *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security - CCS'16*, vol. 1919, no. January, 2017.
- [29] E. Vandamme, “The Future of Blockchain Technology,” *Available at SSRN 3463178*, 2019.
- [30] G. van Leeuwen, T. AlSkaif, M. Gibescu, and W. van Sark, “An integrated blockchain-based energy management platform with bilateral trading for microgrid communities,” *Applied Energy*, vol. 263, 2020.

- [31] A. Hahn, R. Singh, C. C. Liu, and S. Chen, "Smart contract-based campus demonstration of decentralized transactive energy auctions," in *2017 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2017*, 2017.
- [32] M. Foti and M. Vavalis, "Blockchain based uniform price double auctions for energy markets," *Applied Energy*, vol. 254, 2019.
- [33] F. Luo, Z. Y. Dong, G. Liang, J. Murata, and Z. Xu, "A Distributed Electricity Trading System in Active Distribution Networks Based on Multi-Agent Coalition and Blockchain," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 5, 2019.
- [34] P. O. Kriett and M. Salani, "Optimal control of a residential microgrid," *Energy*, vol. 42, no. 1, 2012.
- [35] M. Bornapour, R. A. Hooshmand, and M. Parastegari, "An efficient scenario-based stochastic programming method for optimal scheduling of CHP-PEMFC, WT, PV and hydrogen storage units in micro grids," *Renewable Energy*, vol. 130, 2019.
- [36] G. Wang, Q. Zhang, H. Li, B. C. McLellan, S. Chen, Y. Li, and Y. Tian, "Study on the promotion impact of demand response on distributed PV penetration by using non-cooperative game theoretical analysis," *Applied Energy*, vol. 185, 2017.
- [37] S. Noor, W. Yang, M. Guo, K. H. van Dam, and X. Wang, "Energy Demand Side Management within micro-grid networks enhanced by blockchain," *Applied Energy*, vol. 228, 2018.
- [38] X. Wang, W. Yang, S. Noor, C. Chen, M. Guo, and K. H. Van Dam, "Blockchain-based smart contract for energy demand management," in *Energy Procedia*, vol. 158, 2019.
- [39] M. Afzal, Q. Huang, W. Amin, K. Umer, A. Raza, and M. Naeem, "Blockchain enabled distributed demand side management in community energy system with smart homes," *IEEE Access*, vol. 8, 2020.
- [40] Z. Su, Y. Wang, Q. Xu, M. Fei, Y. C. Tian, and N. Zhang, "A secure charging scheme for electric vehicles with smart communities in energy blockchain," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, 2019.
- [41] S. Thakur, B. P. Hayes, and J. G. Breslin, "A unified model of peer to peer energy trade and electric vehicle charging using blockchains," in *IET Conference Publications*, vol. 2018, 2018.
- [42] J. Kang, R. Yu, X. Huang, S. Maharjan, Y. Zhang, and E. Hossain, "Enabling Localized Peer-to-Peer Electricity Trading among Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using Consortium Blockchains," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 6, 2017.
- [43] E. Dall'Anese, H. Zhu, and G. B. Giannakis, "Distributed optimal power flow for smart microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, 2013.
- [44] P. Šulc, S. Backhaus, and M. Chertkov, "Optimal distributed control of reactive power via the alternating direction method of multipliers," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, no. 4, 2014.
- [45] S. Papathanassiou, H. Nikos, and S. Kai, "A benchmark low voltage microgrid network," *Proceedings of the CIGRE symposium: power systems with dispersed generation*, no. April, 2005.

- [46] Department for Business Energy & Industrial Strategy, “Average annual domestic electricity bills for UK regions,” tech. rep., 2020.
- [47] E. McKenna and M. Thomson, “High-resolution stochastic integrated thermal-electrical domestic demand model,” *Applied Energy*, vol. 165, 2016.

Anexo A. Direcciones de cuenta

Se presentan las direcciones de cuenta de cada agente participante de la micro-red en la *Ethereum Virtual Machine*, por las cuales se interactuaba con la API *Web3*:

Agente de la Micro-red	Dirección de Cuenta EVM
Distribuidora	0xf39fd6e51aad88f6f4ce6ab8827279cfff92266
Usuario 1	0x70997970c51812dc3a010c7d01b50e0d17dc79c8
Usuario 2	0x3c44cdddb6a900fa2b585dd299e03d12fa4293bc
Usuario 3	0x90f79bf6eb2c4f870365e785982e1f101e93b906
Usuario 4	0x15d34aaf54267db7d7c367839aaf71a00a2c6a65
Usuario 5	0x9965507d1a55bcc2695c58ba16fb37d819b0a4dc
Usuario 6	0x976ea74026e726554db657fa54763abd0c3a0aa9
Usuario 7	0x14dc79964da2c08b23698b3d3cc7ca32193d9955
Usuario 8	0x23618e81e3f5cdf7f54c3d65f7fbc0abf5b21e8f
Usuario 9	0xa0ee7a142d267c1f36714e4a8f75612f20a79720
Usuario 10	0xbcd4042de499d14e55001ccbb24a551f3b954096
Usuario 11	0x71be63f3384f5fb98995898a86b02fb2426c5788
Usuario 12	0xfabb0ac9d68b0b445fb7357272ff202c5651694a
Usuario 13	0x1cbd3b2770909d4e10f157cab84c7264073c9ec
Usuario 14	0xdf3e18d64bc6a983f673ab319ccae4f1a57c7097
Usuario 15	0xcd3b766ccdd6ae721141f452c550ca635964ce71
Usuario 16	0x2546bcd3c84621e976d8185a91a922ae77ecec30
Usuario 17	0xbda5747bfd65f08deb54cb465eb87d40e51b197e
Usuario 18	0xdd2fd4581271e230360230f9337d5c0430bf44c0

Cada una de las cuentas detalladas en la Tabla presenta una llave privada con la cual se firman las interacciones con los *smart contracts* del esquema.

Anexo B. Despliegue de contratos

La Figura presenta el despliegue de los *smart contracts* DSM y LEM en la plataforma *blockchain*, desde la cuenta de la distribuidora. Además, se detallan las interacciones con *Web3* y el pago por costos del algoritmo de consenso *Proof of Work*, determinado por el *gas* usado en el despliegue del bloque:

```
web3_clientVersion
eth_accounts
eth_gasPrice
eth_estimateGas
eth_sendTransaction
  Contract deployment: <UnrecognizedContract>
  Contract address:    0x5fbdb2315678afecb367f032d93f642f64180aa3
  Transaction:        0x7c2c3482eb6dc398288ce11a632f4d7614c52598e324eabc46bba8785311059a
  From:               0xf39fd6e51aad88f6f4ce6ab8827279cffffb92266
  Value:              0 ETH
  Gas used:           943304 of 943304
  Block #1:           0x240111f0a5c54249e00d7058b2fab22812c9a155cc60c6f3e18c79aa82eeab0f

eth_getTransactionReceipt
eth_getCode
web3_clientVersion
eth_accounts
eth_gasPrice
eth_estimateGas
eth_sendTransaction
  Contract deployment: <UnrecognizedContract>
  Contract address:    0xe7f1725e7734ce288f8367e1bb143e90bb3f0512
  Transaction:        0xad9bc69c81ebeb8ad9e4bc3803df163e54ed791bd2000413aad6dbb7ccc57a
  From:               0xf39fd6e51aad88f6f4ce6ab8827279cffffb92266
  Value:              0 ETH
  Gas used:           723937 of 723937
  Block #2:           0x525d0a03495cb335027adcb8085c9892f86ed36dbffde7afdaa8feb9a4531c13

eth_getTransactionReceipt
eth_getCode
```

Anexo C. Mercado P2P

La Figura presenta un fragmento de la simulación semanal del mercado local de energía, en el cual se detalla la compra de energía desde el agente 8 de la micro-red a los usuarios 7 y 15 en función de los resultados de despeje de precios del mecanismo de doble subasta:

```
eth_gasPrice
eth_estimateGas
eth_sendTransaction
Transaction: 0x053434fa9dbb933b72520ba8e90255f448f0b634977a475d4e04a196399d1e3e
From: 0x23618e81e3f5cdf7f54c3d65f7fbc0abf5b21e8f
To: 0x14dc79964da2c08b23698b3d3cc7ca32193d9955
Value: 70229.3888 gwei
Gas used: 21000 of 21001
Block #125: 0x86b2def369f0519a63461794118627c2ac4f4988f0f081853fb0ab23e95cfc23

eth_getTransactionReceipt
eth_gasPrice
eth_estimateGas
eth_sendTransaction
Transaction: 0x2525c5d4f018ded71c88bdacc554b20c4e251f39a2a26786cc43da7f48084f33
From: 0x23618e81e3f5cdf7f54c3d65f7fbc0abf5b21e8f
To: 0x71be63f3384f5fb98995898a86b02fb2426c5788
Value: 0.0002 ETH
Gas used: 21000 of 21001
Block #126: 0xfc35357513e24fd0f0a11cf2790d545384a6b9f1bec183a5f1294e0b6220d8

eth_getTransactionReceipt
eth_gasPrice
eth_estimateGas
eth_sendTransaction
Transaction: 0x12baf9e9002e0114981af06c54af1f3bd9533d0c0aff6c50a6dad9a31d8ea6ef
From: 0x23618e81e3f5cdf7f54c3d65f7fbc0abf5b21e8f
To: 0x2546bcd3c84621e976d8185a91a922ae77ecec30
Value: 0.0004 ETH
Gas used: 21000 of 21001
Block #127: 0x0a9450c2732d41dd96bcb802d890693b432e0e46bf949af7e1b61bbf18167b6c

eth_getTransactionReceipt
eth_gasPrice
eth_estimateGas
eth_sendTransaction
Transaction: 0xb39e70f370c13e053ba2fe729e7ba99da725e6d182b30c6cca6005b416060fa5
From: 0x23618e81e3f5cdf7f54c3d65f7fbc0abf5b21e8f
To: 0xcd3b766ccdd6ae721141f452c550ca635964ce71
Value: 41564.3321 gwei
Gas used: 21000 of 21001
Block #128: 0xaa00419d7f9e983ced522bb1b2ee320bb18a67e85531f7665e23dd2833e6427e
```