
Título en español
Title in English



Trabajo de Fin de Máster
Curso 2025–2026

Autor

Nombre completo del autor

Director

Nombre completo del director

Máster en Ingeniería Informática
Facultad de Informática
Universidad Complutense de Madrid

Título en español
Title in English

Trabajo de Fin de Máster en Ingeniería Informática
Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática

Autor
Nombre completo del autor

Director
Nombre completo del director

Convocatoria: Junio 2025
Calificación: 10 (Matrícula de Honor)

Máster en Ingeniería Informática
Facultad de Informática
Universidad Complutense de Madrid
21 de julio de 2025

Autorización de difusión

El abajo firmante, matriculado en el Máster en Ingeniería en Informática de la Facultad de Informática, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo Fin de Máster: “Integración de modelos simulados y reales para la detección de cianobacterias nocivas en entornos acuáticos”, realizado durante el curso académico 2024-2025 bajo la dirección de José Luis Risco Martín y Segundo Esteban San Román en el Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, y a la Biblioteca de la UCM a depositarlo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

Roberto Domínguez Fernández

26 de julio de 2025

Dedicatoria

*A mis padres por haber creído en mí desde el
comienzo de mi etapa universitaria*

Agradecimientos

Quiero agradecer el presente trabajo a la Universidad Complutense de Madrid y a los profesores y compañeros con los que he tenido la suerte de coincidir durante esta etapa de máster universitario. La ayuda que he recibido de todos ellos ha sido fundamental.

Quiero agradecer también al Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática de esta Universidad por haber confiado en mí como investigador en este proyecto, y a todos los investigadores y profesores con los que he podido compartir tiempo de trabajo. Especialmente, quiero agradecer a todos los colaboradores e investigadores que han tenido, directa o indirectamente, participación en los dos proyectos que han permitido la consecución de este trabajo.

Particularmente, quiero agradecer a los profesores José Luis Risco Martín y Segundo Esteban San Román su ayuda individual y su dedicación en el proyecto. Su tiempo, su entrega y sus aportaciones han sido claves en los resultados obtenidos.

A continuación, quiero agradecer la colaboración de los investigadores Giordy Alexander Andrade Aimara y Óscar Fernández Sebastián. Su participación ha sido necesaria en este proyecto. Queda demostrado que el trabajo en equipo es siempre más fructuoso que el trabajo individual.

Por último, quiero agradecer el apoyo de mi familia durante los cuatro años de grado y los dos años de máster. José, Paula María, Sergio, Almudena, abuelos... Gracias por todo desde siempre.

Resumen

Título en español

La fotosíntesis oxigénica llevada a cabo por las cianobacterias ha sido y es imprescindible para la vida aeróbica, aunque un crecimiento rápido y descontrolado de estos microorganismos puede ser perjudicial en entornos acuáticos. Estos microorganismos son especialmente nocivos para la flora y fauna de los entornos de agua dulce y para los seres vivos que requieren de este medio para su subsistencia. Es por tanto un problema muy grave que debe ser tratado de manera rápida y eficiente para preservar estos ecosistemas.

Las técnicas actuales no resuelven eficientemente esta problemática. Esto es debido a que se enfocan en proporcionar una solución en el momento exacto en el que se detectan los primeros indicios de estos crecimientos denominados afloraciones. Detectar estos indicios supone que los efectos nocivos derivados ya están surgiendo, por lo que estas técnicas únicamente se centran en una mitigación tras detección. Implementar nuevas técnicas preventivas que permitan predecir en tiempo y posición estas afloraciones conseguiría alertar a las autoridades, con el objetivo de que puedan tomar medidas antes de que los efectos nocivos derivados sean una realidad.

La solución planteada en el proyectos IA-GES-BLOOM-CM permite simular durante un período de tiempo el desplazamiento de un vehículo autónomo acuático en busca de predicciones de afloraciones de cianobacterias mediante el uso de datos sintéticos. En este trabajo, englobado dentro del proyecto SMART-BLOOMS, se pretende validar esta solución por medio de su adaptación y posterior despliegue sobre unidades reales en un entorno acuático real. De esta manera se podrá emular el comportamiento del vehículo físico y comprobar si funciona acorde a la simulación original. Para llevar a cabo este despliegue es necesario incluir e integrar sensores reales que permitan obtener datos de posicionamiento y orientación del entorno para emular correctamente el comportamiento del vehículo. Debido a que en este trabajo se busca validar el funcionamiento del vehículo, los sensores que no sean estrictamente necesarios para la orientación y el movimiento del vehículo podrán seguir siendo sintéticos.

Palabras clave

Eventos Discretos, Modelado y Simulación, Vehículos Autónomos, Inferencia, Afloraciones de Cianobacterias, Sistemas de Alerta Temprana, Sensores Reales y Simulados, Gemelos Digitales, Computación en el Borde.

Abstract

In the context of today's energy system and the increasing penetration of renewable sources in the power grid, efficient management emerges as a key challenge to ensure grid stability. This master's thesis proposes a simulation and optimisation tool for household energy consumption that responds to dynamic electricity pricing. The main objective is to promote greater flexibility in both residential and non-residential consumption, reducing demand peaks through informed and automated load management decisions.

The Especificación de Sistemas de Eventos Discretos, del inglés *Discrete Event System specification* (DEVS) formalism is used to model and simulate the behavior of various electrical devices. The simulation is complemented by a metaheuristic Recocido Simulado, del inglés *Simulated Annealing* (SA) algorithm, which optimizes load scheduling based on electricity prices and user-defined constraints.

The tool, developed in Python, includes an intuitive graphical user interface that allows users to input their preferences and visualise the results of the optimization process. Its modular architecture enables scalability and adaptation to different scenarios, and has been validated through a set of convergence tests.

The results show that it is possible to shift part of the energy consumption to lower-cost time periods without compromising user preferences or requiring direct intervention. This highlights the potential of Sistema de Gestión Energética Doméstico, del inglés *Home Energy Management System* (HEMS) as key instruments for demand-side flexibility. Despite some identified limitations, such as simplified tariff modeling and lack of real-time data integration, the proposed system lays the groundwork for future developments that could incorporate more devices, multiple households, or even entire energy communities. Overall, this work represents a significant step toward smarter, more active homes within the emerging energy ecosystem.

Key words: *HEMS, IoT, DEVS, Energy flexibility, Energy demand management, Simulated annealing*

Siglas

AG Algoritmos Genéticos. [10](#), [18](#), [19](#)

API Interfaz de Programación de Aplicaciones, del inglés *Application Programming Interface*. [5](#)

DES Simulación de Eventos Discretos, del inglés *Discrete Event Simulation*. [9](#), [10](#)

DEVS Especificación de Sistemas de Eventos Discretos, del inglés *Discrete Event System specification*. [1](#), [5](#), [6](#), [10](#), [13](#), [14](#), [27](#)

DR Programas de respuesta a la demanda, del inglés *Demand Response*. [2](#), [3](#)

GUI Interfaz gráfica de usuario. [15](#), [23](#)

HEMS Sistema de Gestión Energética Doméstico, del inglés *Home Energy Management System*. [2](#), [4](#), [8–10](#), [23](#), [25](#)

IoT Internet de las Cosas, del inglés *Internet of Things*. [4](#), [7](#)

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible. [1](#)

PNIEC Plan Nacional Integrado de Energía y Clima. [2](#)

PSO Optimización por Enjambre de Partículas, del inglés *Particle Swarm Optimization*. [10](#)

PVPC Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor. [5](#)

SA Recocido Simulado, del inglés *Simulated Annealing*. [6](#), [10](#), [15](#), [18](#), [19](#), [22](#), [24](#), [25](#), [27](#)

TFM Trabajo Fin de Máster. [1](#), [2](#), [5–8](#), [10](#), [12](#), [13](#)

UE Unión Europea. [2](#)

VE Vehículo Eléctrico. [10](#)

VEs Vehículos Eléctricos. [9](#), [10](#)

Índice general

Abstract	XIII
Siglas	xv
1. Introducción	1
1.1. Contexto y relevancia del problema	1
1.2. Marco normativo y político	1
1.3. Desafíos técnicos y oportunidades	2
1.3.1. Integración de energías renovables	2
1.3.2. Tecnologías emergentes	4
1.3.3. HEMS	4
1.4. Objetivos del estudio	4
1.5. Metodología	5
1.5.1. Modelado y simulación DEVS	5
1.5.2. Optimización de la configuración de carga	6
1.6. Estructura del documento	6
2. Estado del arte	7
2.1. Revisión de la literatura	7
2.1.1. Gestión de la energía en ciudades	7
2.1.2. Gestión de la energía en hogares	8
2.1.3. Modelos flexibles	8
2.1.4. Modelado, simulación y optimización de sistemas energéticos domésticos	9
2.2. Soluciones disponibles en el mercado	10
3. Implementación	13
3.1. Planificación	13
3.2. Diseño	13
3.2.1. Datos	13
3.2.2. Stack tecnológico	14

3.2.3. Arquitectura	14
3.2.4. Interfaz de usuario	15
3.3. Funcionamiento	16
3.3.1. Lógica DEVS	16
3.3.2. Algoritmo	18
4. Resultados	23
4.1. Test de convergencia	23
4.2. Estudio de caso: ahorro generado por el uso de la herramienta HEMS	25
5. Conclusiones y trabajo futuro	27
5.0.1. Limitaciones	27
5.0.2. Trabajo futuro	28

Índice de tablas

1.1. Componentes de una solución IoT	4
2.1. Algunos programas de respuesta a la demanda residencial en el mercado	11
2.2. Algunos programas de gestión activa de dispositivos electrónicos y electrodomésticos en hogares	11
4.1. Parámetros utilizados en la implementación del algoritmo SA	25
4.2. Comparativa del coste energético diario con y sin optimización	26

Índice de figuras

1.1. Clasificación de programas DR	3
2.1. Elementos clave de la flexibilidad eléctrica	9
3.1. Plan de desarrollo de la solución	13
3.2. Arquitectura general de la herramienta	15
3.3. Interfaz de usuario	16
4.1. Evolución del mejor valor de fitness por iteración	24
5.1. Mock-ups interfaz de usuario	28

Índice de listados de código

3.1. Definición de tarifas horarias	14
3.2. Modelo Lavavajillas en DEVS	17
3.3. Método <code>delttext</code> del Transducer	17
3.4. Modelo acoplado Casa	18
3.5. Algoritmo de Recocido Simulado (<code>simulated_annealing</code>)	20
3.6. Función <code>evaluar_solucion</code>	21
4.1. Convergencia del algoritmo de Recocido Simulado	23

Capítulo 1

Introducción

Esta sección establece las bases para comprender la creciente complejidad de la gestión energética en entornos domésticos inteligentes. Se analizan el contexto actual y los desafíos tecnológicos y regulatorios, para culminar en la presentación de los objetivos, la metodología innovadora basada en simulación DEVS y la hoja de ruta de este Trabajo Fin de Máster (TFM), que busca proponer soluciones eficientes ante la dinámica de las nuevas tarifas eléctricas.

1.1. Contexto y relevancia del problema

La búsqueda de soluciones energéticas sostenibles se ha vuelto en los últimos años cada vez más urgente, motivada por el desafío global de descarbonizar el modelo energético actual y la necesidad de una transformación tecnológica para adaptar las redes al nuevo contexto en el que vivimos [1]. Los gobiernos de todo el mundo han establecido objetivos para esta transición, con el propósito de mitigar los efectos del cambio climático y garantizar un futuro para las próximas generaciones. En respuesta a este desafío, se están desarrollando y proponiendo productos innovadores, así como cambios en la actual gestión de la red eléctrica. Este apartado tiene como objetivo profundizar en el problema, específicamente en el consumo energético de los inmuebles, ya que representa un porcentaje significativo del consumo total de energía.

En el caso de España, durante el periodo 2020-2022, el sector edificios, tanto residenciales como no residenciales, representaba el 32 % del consumo final, del cual el 59 % corresponde a las viviendas. Aunque este dato se encuentra ligeramente por debajo de la media de la Unión Europea, cuyo sector residencial conforma el 25.8 % del consumo final total, este constituye una proporción significativa del uso energético nacional. Por ello, una gestión eficiente de la energía en los hogares es clave para alcanzar los objetivos de sostenibilidad [2, 3, 4].

1.2. Marco normativo y político

El 25 de septiembre de 2015, las Naciones Unidas, de las que España forma parte, aprobaron un conjunto de metas globales conocido como la Agenda 2030, compuesta por 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Como parte del plan nacional de respuesta, la Ley 7/2021, de cambio climático y transición energética, establece un objetivo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del 23 % respecto a niveles de 1990 para el conjunto de toda la economía [5].

Este proyecto se enfoca en el ODS 7, *Energía asequible y no contaminante* y el 13, *Acción por el clima*. Ambos buscan asegurar el acceso a recursos energéticos limpios, que se adapten a la

situación climática actual [6]. En esta línea, este TFM explora la facilitación de la optimización de la demanda, con el objetivo de incentivar un consumo más sostenible que permita una creciente penetración de fuentes renovables y, en general, una adaptación a un modelo más flexible condicionado por el clima.

En el ámbito europeo, el Pacto Verde Europeo establece una hoja de ruta para alcanzar la neutralidad climática en 2050, promoviendo la integración de energías renovables y la eficiencia energética. En línea con estos objetivos, la Directiva de la Unión Europea (UE) 2023/2413, que modifica y refuerza la anterior 2018/2001, eleva el objetivo vinculante de energía renovable al 42,5 % para 2030. Esta actualización impulsa el desarrollo de fuentes limpias y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles, centrándose en la descarbonización de sectores clave.

A nivel nacional, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 plantea un incremento significativo de la generación renovable, con un objetivo de al menos un 74 % de electricidad proveniente de fuentes renovables en 2030 [7]. Además, el Real Decreto 244/2019 regula el autoconsumo eléctrico, permitiendo la compensación de excedentes y fomentando la participación ciudadana en la producción de energía.

Para alcanzar estos objetivos, la gestión de la demanda se impulsa a través de mecanismos como las tarifas eléctricas basadas en señales de precio horario, la flexibilización del consumo mediante el almacenamiento energético y la digitalización de la red eléctrica. Estas estrategias permiten optimizar el uso de la energía, reducir los picos de demanda y favorecer la integración de energías renovables [8].

En definitiva, el marco normativo actual busca favorecer la transición hacia un modelo energético más sostenible, promoviendo tanto el desarrollo de energías renovables como la implementación de estrategias de gestión de la demanda para mejorar la eficiencia del sistema eléctrico, sin embargo, este proceso se enfrenta a numerosos retos.

1.3. Desafíos técnicos y oportunidades

1.3.1. Integración de energías renovables

Tradicionalmente, las redes eléctricas han transmitido principalmente energía proveniente de fuentes no renovables, conocidas por su mayor previsibilidad. A diferencia de estas fuentes, la producción de energía renovable está influenciada por factores como las condiciones climáticas y la hora del día. Además, se está produciendo una mayor electrificación de la demanda con nuevos usos, añadiendo presión durante las horas pico [9]. Por ello, la flexibilidad del sistema eléctrico es fundamental para mantener el equilibrio entre la oferta y la demanda, así como para enfrentar la incertidumbre en sistemas eléctricos con una alta penetración de energías renovables, cuya producción está influenciada por factores externos [10]; [11]. Si bien en la fecha en la que se presenta este trabajo las causas del apagón sufrido en la Península Ibérica el pasado 28 de abril de este mismo año no se conocen, se ha señalado que una posible causa podría estar relacionada con fluctuaciones en la generación energética proveniente de fuentes renovables. Esto evidencia aún más la urgencia de una adaptación de nuestro consumo al contexto energético actual.

Existen numerosas maneras de trabajar la flexibilidad de una red eléctrica, no obstante, en este proyecto nos centramos en la flexibilidad del lado de la demanda, es decir, el ajuste de patrones de consumo en respuesta a señales del mercado o problemas en la red, utilizando Programas de respuesta a la demanda, del inglés *Demand Response* (DR) y HEMS. Esto implica concentrarse en cambiar los patrones de consumo en respuesta a las señales del mercado o problemas de la red, en lugar de ajustar la generación. Este enfoque no excluye el ajuste de la generación, sino que lo

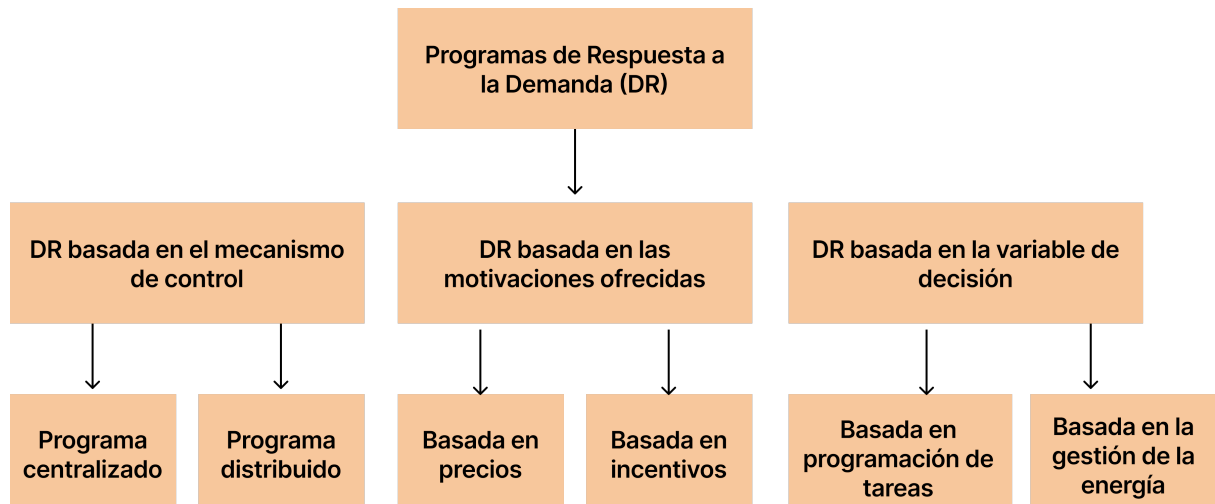


Figura 1.1: Clasificación de programas DR

complementa dentro de un sistema energético integrado y flexible. Es decir, la gestión activa de la demanda busca optimizar el uso de la generación existente, especialmente la renovable [12]. Los programas DR, benefician a las empresas distribuidoras además de a los clientes, ya que las empresas encuentran de esta manera un modo de gestionar los picos de la demanda, mientras que los usuarios reducen su gasto en energía.

El funcionamiento de un DR es el siguiente [13]:

1. El operador de la red identifica un posible problema de estabilidad en el sistema y envía una notificación al agregador para activar un servicio de equilibrio.
2. El agregador recibe la notificación y aplica algoritmos especializados para optimizar la distribución de la demanda eléctrica entre los clientes de su cartera, ajustando el consumo energético según sea necesario (reducir o incrementar).
3. Los clientes designados ajustan su nivel de consumo o generación de energía, ya sea de forma automática mediante sistemas inteligentes o manualmente.
4. La regulación de la carga realizada por los clientes se pone a disposición del operador de la red para mantener el equilibrio.
5. Una vez verificado que el servicio de equilibrio se ha ejecutado correctamente, el cliente recibe la compensación correspondiente, de acuerdo con los términos establecidos en el contrato.

Dentro de este tipo de programas cabe hacer una clasificación de los diferentes subgrupos que existen. Este diagrama, adaptado del trabajo de [12], lo organiza tal como se ilustra en la Figura 1.1.

El programa de respuesta a la demanda que se propone en este trabajo, se trata de un sistema inteligente que gestiona el consumo de los dispositivos de manera automática, sin necesidad de un papel activo por parte del usuario. También, optimiza el consumo de los dispositivos sin depender de incentivos externos o cambios manuales. Por lo tanto, según esta clasificación, se trata de un DR basada en la gestión de la energía.

1.3.2. Tecnologías emergentes

El Internet de las Cosas, del inglés *Internet of Things* (IoT), se refiere a una red de dispositivos físicos, vehículos, electrodomésticos y otros objetos físicos que están integrados con sensores, software y conectividad de red que les permite recopilar y compartir datos [14]. Por ello, el IoT tiene un rol clave en la gestión de la energía en los hogares, facilitando la interacción entre los consumidores y los proveedores de energía, y permitiendo una gestión más inteligente del consumo energético en los hogares [15]. Generalmente, una solución IoT esta compuesta por los elementos que se muestran en la Tabla 1.1 [16].

Tabla 1.1: Componentes de una solución IoT

Componente	Descripción
Sensores	Recopilan datos del entorno.
Actuadores	Permiten tomar medidas basadas en los datos recopilados. Son dispositivos que controlan mecanismo que respondan a la información de los sensores.
Redes de comunicación	Infraestructura que permite la transferencia de datos entre sensores, nodos IoT y sistemas de gestión.
Nodos IoT	Dispositivos que recopilan datos de sensores y actúan como enlaces de comunicación con la red.
Sistemas de gestión	Responsables de coordinar y gestionar el flujo de datos dentro de la arquitectura IoT. Almacenan, procesan y analizan datos, y pueden tomar decisiones basadas en esa información.
Plataformas de visualización	Permiten a los usuarios ver y comprender los datos recopilados. Proporcionan interfaces gráficas para monitorizar variables en tiempo real.

1.3.3. HEMS

Un HEMS, es un sistema inteligente que monitoriza, controla y optimiza el uso de la energía dentro de una vivienda mediante el uso de diferentes tecnologías [13]. Un análisis comparativo de 25 estudios realizado por Rahmani et al. en 2022 [17], concluye que los HEMS pueden reducir los costes operacionales de la electricidad en un 23,1 %, o reducir la demanda en las horas pico en un 29.6 % . Las funciones principales de estos tipos de sistemas incluyen:

- Monitorización en tiempo real del consumo energético.
- Gestión de cargas de los aparatos eléctricos del hogar.
- Optimización de autoconsumo si hay generación local (por ejemplo, placas solares).
- Participación en redes inteligentes o comunidades energéticas (virtuales y/o físicas).

1.4. Objetivos del estudio

Con el objetivo de ayudar en este proceso de adaptación a una red eléctrica que sea capaz de dar respuesta a los retos a los que nos enfrentamos, y, fundamentalmente, a la reducción

del consumo eléctrico, **proponemos una herramienta de simulación de la gestión del consumo eléctrico de diferentes dispositivos en un hogar, que tenga como referencia un sistema de tarifas dinámicas, imitando así el comportamiento real del mercado eléctrico actual.** Para ello, nos marcamos los siguientes objetivos:

- Identificar un conjunto de datos que refleje las tarifas del mercado eléctrico español actual y que nos permita desarrollar nuestra herramienta. Se utiliza una tarifa variable, en este caso con tres franjas horarias diferentes (punta, llano, valle). Se ha escogido este tipo de tarifa, puesto que otorga margen para la optimización del consumo, beneficiando aquellas horas cuya producción energética sea más elevada, mientras que dota de suficiente estabilidad de los precios para permitirnos examinar con claridad los resultados de la herramienta. Es por ello que esta configuración se ha alejado del Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC); no obstante, esta herramienta podría aplicarse con cualquier tipo de tarifa.
- Desarrollar una simulación del consumo energético de los dispositivos de un hogar y proponer un método para optimizarlo.
- Diseñar una interfaz sencilla que permita al usuario introducir sus preferencias y visualizar los resultados de la simulación.

1.5. Metodología

La metodología empleada para desarrollar la herramienta de simulación y optimización del consumo energético en hogares inteligentes se centra en dos aspectos principales: el modelado y simulación mediante el formalismo DEVS, y la optimización de la configuración de carga utilizando algoritmos heurísticos.

1.5.1. Modelado y simulación DEVS

El formalismo DEVS es una metodología robusta para modelar y simular sistemas de eventos discretos [18]. DEVS permite representar sistemas complejos mediante la descomposición en modelos atómicos y acoplados, facilitando la modularidad y la reutilización de componentes. En el contexto de este TFM, DEVS se utilizará para modelar el consumo energético de los dispositivos en un hogar inteligente, como estaciones de carga de vehículos eléctricos, lavadoras y lavavajillas.

El uso de DEVS es particularmente adecuado para este proyecto debido a su capacidad para manejar la dinámica de sistemas donde los eventos ocurren en momentos discretos en el tiempo, esencial para simular el comportamiento de dispositivos que operan en intervalos específicos. DEVS permite también integrar fácilmente diferentes modelos de dispositivos y gestionar la interacción entre ellos, lo que es muy útil para evaluar el impacto de las tarifas dinámicas en el consumo energético total del hogar.

Para implementar el modelo DEVS, se utilizará la Interfaz de Programación de Aplicaciones, del inglés *Application Programming Interface* (API) multi-plataforma de simulación xDEVS, que proporciona un entorno de desarrollo integrado para la creación y ejecución de modelos DEVS [19]. Esta herramienta permitirá la visualización y análisis de los resultados de la simulación, facilitando la identificación de patrones de consumo y la evaluación de estrategias de optimización.

La simulación en DEVS se complementará con un conjunto de datos de tarifas eléctricas dinámicas, que se utilizarán como entrada para el modelo. Estos datos permitirán evaluar cómo las

variaciones en las tarifas afectan el comportamiento de los dispositivos y, en última instancia, el consumo energético total del hogar.

1.5.2. Optimización de la configuración de carga

Para abordar la optimización de la configuración de carga en hogares inteligentes, se ha optado por el uso de SA, una técnica de optimización heurística inspirada en el proceso físico de recocido de metales [20]. SA es especialmente adecuado para problemas complejos de optimización, debido a su capacidad para escapar de óptimos locales y explorar de manera eficiente espacios de búsqueda amplios.

El algoritmo simula el enfriamiento gradual de un material, permitiendo aceptar soluciones peores en las primeras etapas para evitar quedar atrapado en soluciones menos óptimas. A medida que avanza el proceso, la “temperatura” se reduce, y el algoritmo se vuelve más selectivo, afinando la búsqueda hacia las mejores soluciones. En este contexto, cada solución candidata representa una posible programación horaria de los dispositivos del hogar, como la lavadora, el lavavajillas y el cargador de vehículo eléctrico, optimizando su funcionamiento en función de los precios horarios y las restricciones de la red.

En el contexto de este TFM, el algoritmo de SA utilizará el modelo de simulación DEVS para evaluar el impacto de distintas configuraciones de carga bajo tarifas dinámicas. Esta integración permitirá optimizar el consumo energético y validar la efectividad del sistema propuesto en un entorno simulado que reproduce las condiciones reales del mercado eléctrico.

1.6. Estructura del documento

Para el desarrollo de nuestro proyecto, el trabajo se estructura en cinco capítulos. En primer lugar, se introduce el problema abordado, incluyendo el por qué de su relevancia y una introducción a los conceptos y tecnologías clave (Capítulo 1). Seguidamente, se realiza una revisión de la literatura sobre el tema, así como una exploración de los diferentes softwares que ya existen en el mercado, con el objetivo de comprender el estado de la cuestión (Capítulo 2). A continuación, se implementa la herramienta (Capítulo 3). Primero, se generan los datos utilizados para el desarrollo de la herramienta, simulando los valores de los datos encontrados en la realidad, y, después, estos se utilizan para el desarrollo de la simulación. Una vez obtenido resultados de la simulación, se exponen estos junto con un análisis del rendimiento de la implementación (Capítulo 4). Finalmente, a partir de los resultados se presentan las próximas etapas para abordar las limitaciones de la solución (Capítulo 5).

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Revisión de la literatura

Esta sección investiga la actual gestión de la energía a nivel nacional, profundizando en los retos a los que se enfrenta la red eléctrica y las tendencias que estamos viendo en los demás países europeos. Además, se explora el concepto de flexibilidad eléctrica y se sitúa nuestro proyecto en este contexto. Esta exploración de la literatura permite identificar brechas existentes en este ámbito, las cuales este trabajo pretende abordar mediante una solución innovadora basada en simulación y optimización.

2.1.1. Gestión de la energía en ciudades

De acuerdo con el Banco Mundial, más del 55 % de la población global ya vive en áreas urbanas, y las proyecciones indican que para 2050 esa proporción superará el 68 %, lo que significa que casi siete de cada diez habitantes del planeta residirán en ciudades [21]. Este crecimiento urbano acelerado implica un aumento considerable de la demanda energética en las ciudades, tanto por el incremento de población como por la concentración de actividades económicas y servicios. En consecuencia, la gestión eficiente del consumo energético en entornos urbanos se convierte en un desafío clave para garantizar la sostenibilidad y facilitar la integración de energías renovables, aspectos que constituyen el eje central de este TFM.

La consecuente creciente electrificación de la demanda y la presión climática están redefiniendo la gestión energética urbana, ahora entendida como un proceso integral que engloba la planificación y operación de redes físicas y digitales, la participación ciudadana, y la coordinación de distintas fuentes energéticas (electricidad, calor y movilidad) [22]. Este nuevo modelo se apoya, en primer lugar, en la digitalización de las infraestructuras. Para ello, el uso de sensores, IoT, o gemelos digitales son herramientas clave para monitorizar en tiempo real los flujos energéticos y anticipar picos de carga, lo que reduce pérdidas y mejora la eficiencia global del sistema [23]. Los gemelos digitales, del inglés Digital Twins, facilitan la simulación de distintos escenarios de consumo, producción y almacenamiento, ya que permiten la creación de réplicas virtuales de redes energéticas, edificios o incluso distritos completos [24, 25]. Esto es clave para monitorizar los flujos energéticos y anticipar picos de carga, sin necesidad de implementar estos sistemas en la vida real. En definitiva, la adopción de esta tecnología posibilita la toma de decisiones informada, la prevención de incidentes y la aceleración de la construcción de redes adecuadas al consumo actual.

Paralelamente, el desarrollo de tecnologías de almacenamiento, proporciona flexibilidad para absorber los excedentes generados por fuentes renovables, buscando la estabilidad de unas redes cada vez más dinámicas [26].

Gracias a estos avances tecnológicos, emerge un modelo de generación distribuida en el que los individuos pueden convertirse en prosumidores, es decir, productor y consumidor simultáneo capaz de inyectar sus excedentes a la red o intercambiarlos dentro de mercados locales a través de plataformas. Esto, acompañado de la rehabilitación del parque edificatorio, aumenta la eficiencia y contribuye a la reducción de la demanda en horas punta [27]. Los beneficios asociados a la rehabilitación de edificios se potencian al integrarse con soluciones de gestión energética como la propuesta en este TFM. En este contexto, los HEMS, aplicados a un parque de edificios modernizado, permiten una gestión eficiente de la energía, reduciendo el consumo y maximizando el retorno de las inversiones en infraestructuras inteligentes.

En definitiva, la gestión energética en las ciudades avanza hacia un ecosistema participativo y flexible, donde la coordinación inteligente de los diferentes actores y el empleo de las tecnologías es clave para la creación de un modelo más sostenible y adaptable a las nuevas y crecientes necesidades.

2.1.2. Gestión de la energía en hogares

A nivel nacional, España se ha establecido objetivos ambiciosos a través de planes como el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030, el cual busca reducir un 43 % el consumo de energía final y alcanzar 53,5 Mtep de ahorro energético para 2030, con un foco especial en la energía consumida en los hogares [28]. Para ello, es clave que la regulación actual promueva el auto-consumo. No obstante, la actual compensación por la energía exportada a la red es muy baja, ya que está basada en el precio medio del mercado mayorista [29]. Esto, conceptualmente va contra de la actual Ley de Cambio Climático, que promueve comunidades energéticas y auto-consumo colectivo [30]. Es decir, a pesar de que la legislación comience a poner el foco en el auto-consumo, persisten barreras para su desarrollo. Sin embargo, los efectos a corto plazo de estos planes, acompañados de la tendencia europea de apoyo al auto-consumo, redundarán indudablemente en una mayor flexibilidad del mercado. Para que esta tendencia resulte en un cambio integral del mercado energético a nivel residencial, es esencial que venga acompañado de una mayor transparencia en las tarifas eléctricas y una mayor flexibilidad de costes en su facturación. En definitiva, para impulsar un cambio en los hábitos de consumo de los ciudadanos, es necesario crear incentivos económicos, y, para ello, un mayor control sobre el consumo, acorde a unas tarifas a nivel cliente dinámicas, resulta clave. En el mercado eléctrico europeo, las pequeñas empresas están ofreciendo tarifas cada vez más dinámicas, las cuales, combinadas con sistemas de gestión de energía del hogar, pueden maximizar los beneficios de estas empresas y el de los consumidores. Se refiere comúnmente a estas tarifas como ToU [31]. En los años venideros se espera que estas tarifas sean más comunes y se extiendan a un mayor porcentaje de los hogares en España. Es por ello que resulta incluso más relevante ahora el desarrollo de productos que hagan uso de estos modelos y fomenten la flexibilidad del consumo de la energía.

2.1.3. Modelos flexibles

Como se ha expuesto anteriormente, los modelos flexibles de electricidad son sistemas que permiten adaptar en tiempo real la generación, el consumo y el almacenamiento de energía para equilibrar la oferta y la demanda, especialmente en un contexto de alta penetración de energías renovables. Esta flexibilidad es esencial para garantizar la estabilidad de la red y aprovechar al máximo la energía "limpia" disponible, evitando tanto el desperdicio de excedentes como la dependencia de fuentes fósiles en momentos de alta demanda [32];[33];[34].

El diagrama 2.1, de elaboración propia, busca sintetizar los elementos claves que conforman la flexibilidad eléctrica, específicamente cuando tratamos la flexibilidad eléctrica en el mercado de

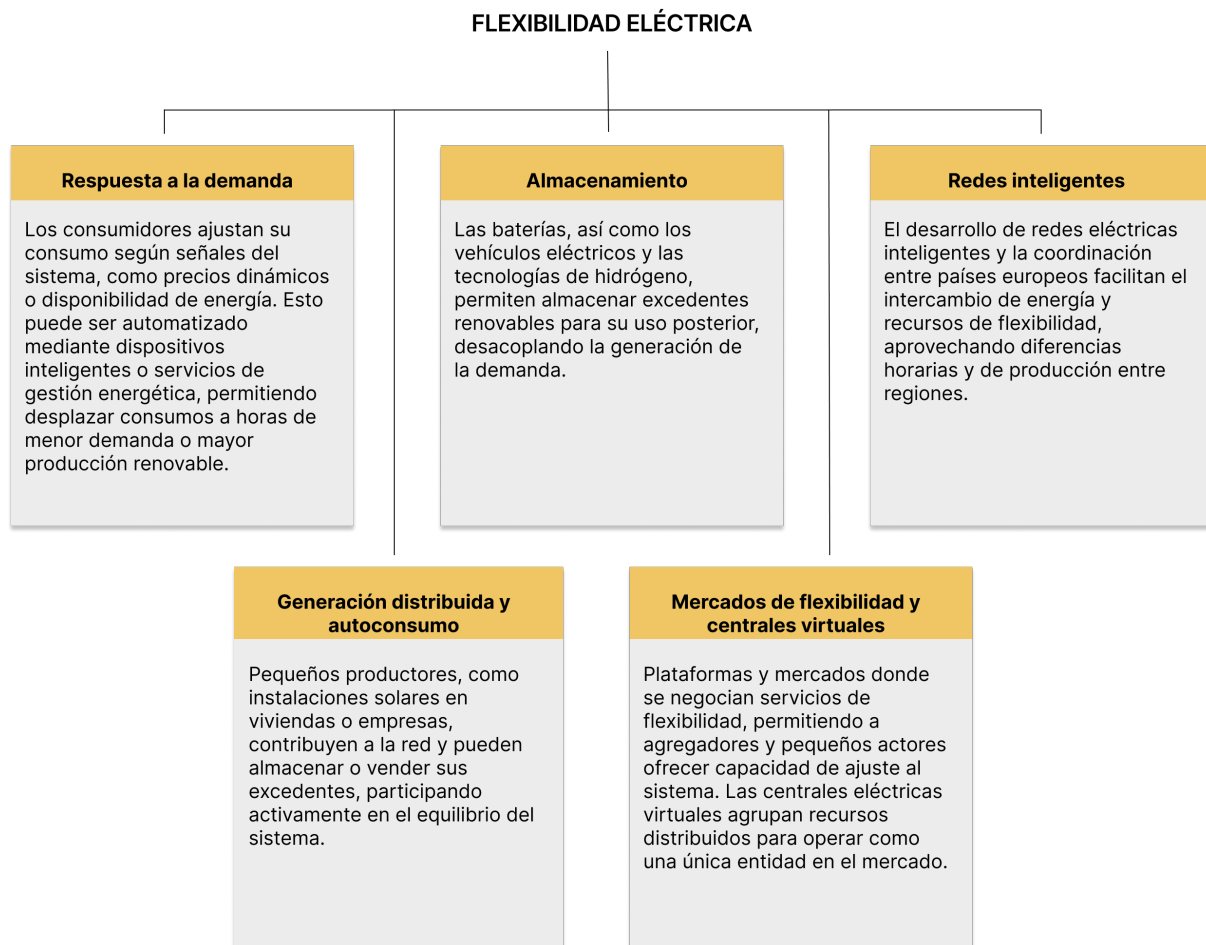


Figura 2.1: Elementos clave de la flexibilidad eléctrica

energía europeo. Fuentes: [32]; [35]; [36]; [37].

Como se indicaba anteriormente en este trabajo, la solución aquí propuesta se centra en la flexibilidad del lado de la demanda, por lo tanto cae en el apartado de respuesta a la demanda de este diagrama. En definitiva, nuestra herramienta busca desplazar el consumo de nuestros usuarios a horas de menor demanda o mayor producción renovable, aportando ahorros en el proceso.

2.1.4. Modelado, simulación y optimización de sistemas energéticos domésticos

La creciente complejidad de los sistemas energéticos domésticos, impulsada por la proliferación de dispositivos inteligentes, la generación distribuida (como paneles fotovoltaicos), el almacenamiento energético (baterías), la carga de Vehículos Eléctricos (VEs) y la exposición a tarifas eléctricas dinámicas, exige herramientas avanzadas para su análisis y gestión eficiente. Los HEMS buscan optimizar el consumo energético en este entorno dinámico, considerando las preferencias del usuario, los costes operativos y las posibles restricciones de la red. Para diseñar y evaluar estrategias de HEMS de manera efectiva, el modelado y la simulación detallados son imprescindibles, permitiendo explorar el comportamiento del sistema bajo diversos escenarios antes de una costosa implementación real.

La Simulación de Eventos Discretos, del inglés *Discrete Event Simulation* (DES) emerge como un paradigma particularmente adecuado para modelar la operación de los HEMS. En estos sistemas,

los cambios de estado significativos (encendido/apagado de electrodomésticos, inicio/fin de carga del Vehículo Eléctrico (VE), cambios en la tarifa eléctrica, eventos de respuesta a la demanda) ocurren en instantes discretos en el tiempo. La literatura ha explorado el uso de DES para analizar diversos aspectos de la gestión de la demanda residencial, la integración de VEs y la operación de micro-redes que incluyen componentes domésticos [38, 39].

Dentro del ámbito de DES, el formalismo DEVS, propuesto por Zeigler [18], ofrece un marco matemático riguroso y estructurado para el modelado y simulación. Sus principios de modularidad, jerarquía y encapsulamiento facilitan la construcción de modelos complejos a partir de componentes más simples y reutilizables. Esta capacidad es especialmente valiosa para los HEMS, donde cada dispositivo (lavadora, cargador de VE, termostato) puede ser modelado como un componente atómico DEVS con su propia dinámica interna y puertos de interacción, y luego acoplados para representar el sistema doméstico completo. Si bien las aplicaciones de DEVS se han demostrado robustas en dominios como las redes de comunicación y la manufactura [40, 41], y existen trabajos que exploran su uso en el modelado de redes eléctricas y sistemas de potencia [42, 43], su aplicación específica y detallada para la optimización integrada de HEMS residenciales bajo tarifas dinámicas es un área con un considerable potencial de desarrollo. Este TFM adopta el formalismo DEVS para construir un simulador del hogar inteligente que sirva de base para la evaluación precisa de estrategias de gestión de la carga.

Una vez desarrollado un modelo de simulación capaz de replicar el comportamiento energético del hogar, el siguiente desafío es encontrar una política de operación óptima para los dispositivos. Dada la naturaleza combinatoria y a menudo no lineal de los problemas de scheduling de electrodomésticos y cargas en HEMS, especialmente bajo restricciones complejas y tarifas variables, las metaheurísticas se presentan como una solución pragmática y eficiente. Estos algoritmos de optimización, como SA, Algoritmos Genéticos (AG), o Optimización por Enjambre de Partículas, del inglés *Particle Swarm Optimization* (PSO), son capaces de explorar grandes espacios de búsqueda para encontrar soluciones de alta calidad en tiempos computacionales razonables [44]. El algoritmo SA, en particular, ha demostrado ser eficaz en problemas de scheduling y optimización combinatoria debido a su capacidad para escapar de óptimos locales [20, 45].

La contribución distintiva de este TFM radica en la integración del modelado formal DEVS con un algoritmo de optimización metaheurística (SA). En este enfoque, el simulador DEVS no es solo una herramienta de análisis pasivo, sino que actúa como el motor de evaluación (función de *fitness* o coste) dentro del bucle de optimización del SA. Cada posible plan de carga generado por el SA es simulado detalladamente usando el modelo DEVS del hogar, y el resultado de la simulación (coste energético, picos de demanda, cumplimiento de restricciones) determina la calidad de dicha solución. Esta combinación permite una optimización informada y realista del consumo energético doméstico. A pesar de los avances individuales en simulación DES y en la aplicación de metaheurísticas a la gestión energética, la literatura específica que documente esta integración de DEVS con SA para la optimización de HEMS residenciales multifactoriales es limitada, representando una oportunidad de investigación que este trabajo busca abordar. Por ejemplo, mientras algunos trabajos utilizan SA para la gestión de la demanda en redes inteligentes o para la carga de VE [45, 46], la articulación con un modelo de simulación basado en el formalismo DEVS para el hogar completo es menos común.

2.2. Soluciones disponibles en el mercado

Con el objetivo de entender los productos que ya están disponibles en el mercado, aprender de ellos, e identificar qué servicios de un programa de respuesta a la demanda de carácter residencial son más difíciles de encontrar, comenzamos recogiendo nuestra búsqueda en las siguientes tablas 2.1, 2.2:

Tabla 2.1: Algunos programas de respuesta a la demanda residencial en el mercado

Nombre	Empresa	Breve descripción
Plan de descuento de verano	[47]	El aire acondicionado central se apaga automáticamente durante los eventos de ahorro.
Programa de Energía Inteligente	[47]	Un termostato inteligente ajustado automáticamente.
Programa de recompensas de ahorro de energía	[47]	Reduce el consumo de electricidad durante los eventos entre las 4 p.m. y las 9 p.m., del 1 de mayo al 31 de octubre.
Power Saver Rewards Program	[48]	Reduce el consumo de electricidad durante los eventos entre las 4 p.m. y las 9 p.m., del 1 de mayo al 31 de octubre.
SmartAC™	[48]	Desvía de forma remota parte del consumo del aire acondicionado fuera de las horas de mayor demanda.
Respuesta de la demanda	[49]	Adaptan la oferta del DR ajustándolo a las necesidades del cliente, se especializan en aires acondicionados.

Tabla 2.2: Algunos programas de gestión activa de dispositivos electrónicos y electrodomésticos en hogares

Nombre	Empresa	Breve descripción
Google Home + Nest	[50]	Automatiza las tareas y permite monitorizar los dispositivos Google desde cualquier lugar mediante una aplicación o mediante voz.
Alexa Smart Home	[51]	Automatiza las tareas y permite monitorizar los dispositivos Amazon desde cualquier lugar mediante una aplicación.
Home Connect	[52]	Permite controlar los electrodomésticos en una aplicación.

Esta segunda tabla recoge productos que, aunque no son DR de gestión de la energía al requerir la actuación activa de los usuarios, pueden proporcionar cierta capacidad de adaptación a las tarifas eléctricas variables si se les informa adecuadamente.

Después de realizar esta búsqueda de soluciones y analizar sus prestaciones llegamos a las siguientes conclusiones:

- La oferta de DRs se centra en dispositivos concretos, por ejemplo, aires acondicionados, no siendo común la propuesta de un sistema holístico que permita la gestión automática de varios dispositivos diferentes a la vez.
- Los servicios más comunes son de carácter estacional, ofreciendo incentivos únicamente durante los meses más calurosos.
- Las grandes empresas tecnológicas han optado por productos que permiten la gestión de productos pertenecientes a sus marcas, necesitando de la intervención del cliente para ello. No se ha identificado ninguna asociación entre estas empresas y otras del sector eléctrico para ofrecer productos que automaticen la gestión de los dispositivos sin la intervención del usuario.

En definitiva, están surgiendo productos que buscan aliviar esta problemática y permitir una carga informada de los dispositivos de los usuarios. Además, si bien aún no existen DRs en el mercado público, comienzan a proponerse programas pilotos de diferentes distribuidoras, que comienzan por la gestión de un dispositivo, principalmente los vehículos eléctricos, y después es posible que pivoten a una oferta más holística. Es el caso del plan Intelligent Go de Octopus Energy [53] o el Asistente Smart Avanzado de Iberdrola [54]. Estas propuestas requieren que el vehículo tenga conectividad y que el usuario indique su hora de salida para que las distribuidoras puedan gestionar las cargas, al igual que la herramienta aquí propuesta. Ambos indican que su sistema de gestión de la carga permite al usuario cargar sus dispositivos en las horas más favorables para los consumidores, no obstante, no se informa de los métodos utilizados para ello. Se sobreentiende el uso de algún tipo de optimización, pero su naturaleza se desconoce. En definitiva, si bien la filosofía de estos productos son similares al propuesto en este TFM, falta transparencia sobre el funcionamiento de estos sistemas, y quedan limitados a la carga de vehículos eléctricos. Sin embargo, se espera que programas así evolucionen a ofertas más completas, que permitan la gestión inteligente de una mayor variedad de dispositivos como pretende hacer este proyecto.

Capítulo 3

Implementación

Esta sección detalla el diseño y desarrollo de la solución propuesta, apoyándose en diagramas y fragmentos de código. Se profundiza en la arquitectura del sistema, el funcionamiento de los modelos DEVS implementados y la lógica del algoritmo de optimización para la generación de planes de carga.

3.1. Planificación

Para facilitar el desarrollo de la herramienta se divide esta en cuatro tareas diferentes: recopilación de los datos, desarrollo del simulador, optimización de la simulación y examen de la herramienta, tal como se ilustra en la Figura 3.1.

3.2. Diseño

3.2.1. Datos

Si bien se usan tarifas eléctricas del mercado para la validación robusta en este TFM, una aplicación real debería idealmente permitir al usuario introducir su tarifa específica o conectarse a un proveedor de datos de su tarifa. Esto se debe a que el objetivo principal de este tipo de esquemas es dar ahorro al cliente y, en segundo lugar, a la proveedora eléctrica. Además, una tarifa de cliente más baja suele coincidir con los momentos en los que el precio de mercado también es más asequible. No obstante, al utilizar las tarifas de mercado, que son más dinámicas, conseguimos probar el funcionamiento de esta herramienta para condiciones más complejas. De esta forma garantizamos que nuestra solución sea válida para las nuevas tarifas, que, impulsadas por la flexibilidad de la demanda, tienden a alejarse de los esquemas de tarifa plana para adoptar precios más variables a lo largo del día.

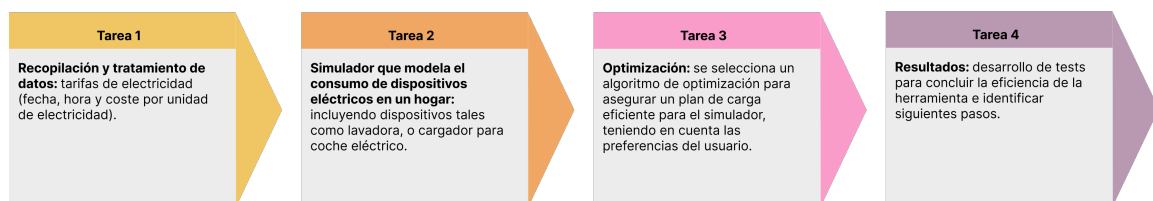


Figura 3.1: Plan de desarrollo de la solución

Al comienzo del código que gestiona el cálculo de los costes y la optimización de ellos se define un array con los valores a utilizar, tal como aparece en el [Listado 3.1](#).

Listado 3.1: Definición de tarifas horarias

```
TARIFAS_HORA = [
    0.07, 0.07, 0.07, 0.07, 0.07, 0.07, #00h-05h (Valle)
    0.13, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13, #06h-11h (Llano)
    0.19, 0.19, 0.19, #12h-14h (Punta)
    0.13, 0.13, 0.13, #15h-17h (Llano)
    0.19, 0.19, 0.19, 0.19, #18h-21h (Punta)
    0.07, 0.07 #22h-23h (Valle)
]
```

Como se expone en el apartado de Objetivos de este trabajo, escogemos una tarifa variable, en este caso con tres franjas horarias diferentes (punta, llana, valle), con el objetivo de otorgar margen para la optimización del consumo, mientras que se dota de suficiente estabilidad a los precios para permitirnos examinar con claridad los resultados de la herramienta.

De manera alternativa, y para dotar a la herramienta de más exactitud, se podría conectar el código con una fuente de datos de tarifas eléctricas reales, si bien, para una primera aproximación al problema esto no resulta necesario.

3.2.2. Stack tecnológico

La solución está programada en Python, utilizando librerías propias de este lenguaje para el desarrollo de las diferentes funcionalidades. Algunas de las librerías utilizadas son:

- xdevs: para la simulación del modelo DEVS.
- tkinter y ttkbootstrap: para el desarrollo de la interfaz de usuario.
- matplotlib y numpy para los gráficos de los tests de convergencia.

El código a su vez está publicado en un repositorio en GitHub [\[55\]](#).

3.2.3. Arquitectura

La arquitectura de esta solución incluye tres capas: la capa de presentación, la capa de aplicación y la capa de datos. La capa de presentación es la que interactúa directamente con los usuarios, ofreciendo una interfaz sencilla de utilizar, mientras que la capa de aplicación gestiona la lógica del sistema. Los scripts de Python operan dentro de esta capa para simular y optimizar las cargas. Esta arquitectura se representa de forma simplificada en el diagrama [3.2](#).

La arquitectura del sistema se basa en el modelo DEVS, lo que permite representar cada dispositivo del hogar como un sistema autónomo que reacciona a eventos discretos. Cada uno de estos dispositivos está implementado como un modelo atómico, con su propia lógica de estados, duración de funcionamiento y consumo energético.

Estos modelos atómicos están integrados dentro de un modelo acoplado llamado “Casa”, que se encarga de conectar los componentes y gestionar el flujo de eventos y energía. La simulación se inicia a partir de un conjunto de eventos, que se emiten desde un componente “Generador”. Este generador interpreta eventos en formato hora-dispositivo-acción y los envía al componente correspondiente, activando o desactivando cada aparato.

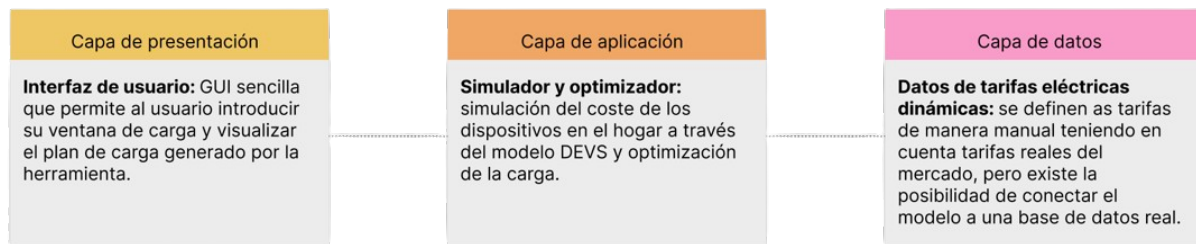


Figura 3.2: Arquitectura general de la herramienta

El sistema cuenta además con un componente "Transducer", que mide métricas clave como el consumo total, el consumo por hora y el pico de energía alcanzado durante la simulación. Estas métricas son fundamentales para evaluar la eficiencia de cada posible plan de carga propuesto.

La lógica de optimización está separada del sistema de simulación. Se hace uso de un algoritmo de tipo SA para generar combinaciones de horarios para el uso de los dispositivos, simulando cada combinación con el modelo DEVS completo. Aunque esta aproximación permite una evaluación rigurosa del comportamiento del sistema, puede implicar un elevado coste computacional, especialmente al utilizar algoritmos de tipo poblacional. Por esta razón, y dado que el objetivo principal es minimizar el coste energético total, se opta por emplear el algoritmo SA. Esta técnica está especialmente diseñada para explorar de forma eficiente espacios de solución amplios. El algoritmo respeta además las restricciones impuestas por el usuario, como los horarios de disponibilidad del coche y las horas máximas de inicio para los electrodomésticos, usando directamente las duraciones definidas en sus respectivas clases.

Finalmente, se incluye una interfaz gráfica construida con tkinter y ttkbootstrap que permite al usuario introducir sus preferencias de horario y lanzar el optimizador. Esta interfaz presenta el resultado, mostrando el plan de uso elegido y los eventos generados, sin necesidad de interactuar directamente con el código.

3.2.4. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario de esta herramienta está basado en las librerías tkinter y ttkbootstrap de Python, y coge la forma de un pop-up. Se trata de una Interfaz gráfica de usuario (GUI) sencilla que permite al usuario indicar la hora de llegada y la hora de salida y, a partir de estos datos, generar un plan de carga optimizado que se muestra en un calendario. Esta visualización busca mostrar de una manera clara y visual el resultado de la optimización. El calendario se adapta en función de la hora de llegada indicada. La figura 3.3 muestra esta interfaz.

Optimizador de Consumo Energético

Hora de entrada (0-23):
18

Hora de salida (0-23):
7

Optimizar

Hora	Coche	Lavadora	Lavavajillas
18:00			
19:00			
20:00			
21:00			
22:00	🚗		
23:00	🚗		
00:00	🚗		
01:00	🚗	🍲	
02:00	🚗	🍲	🍽️
03:00	🚗	🍲	🍽️
04:00	🚗		
05:00	🚗		
06:00	🚗		
07:00			
08:00			
09:00			
10:00			
11:00			
12:00			
13:00			
14:00			
15:00			
16:00			
17:00			

Figura 3.3: Interfaz de usuario

3.3. Funcionamiento

3.3.1. Lógica DEVS

Como se introduce en capítulos anteriores, DEVS es un marco modular y jerárquico utilizado para representar sistemas discretos basados en eventos, lo que nos permite modelar de manera precisa y reutilizable los distintos componentes eléctricos de una casa [56, 18]. A continuación, se explica en más detalle el funcionamiento de los diferentes componentes de nuestro sistema DEVS, con fragmentos de nuestro código para proveer una visión más completa.

- **Modelos atómicos:** Cada dispositivo del sistema (lavadora, lavavajillas, cargador de coche) se implementa como un modelo atómico, compuesto por:
 - Funciones de transición interna (deltint)
 - Funciones de transición externa (delttext)
 - Función de salida (lambdaf)

Este modelo representa el ciclo de la lavadora. Recibe una señal de inicio (start) y transiciona por las fases inicio, lavando y passive, calculando la energía consumida durante la

fase de lavado, tal como aparece en [Listado 3.2](#). El modelo para otros electrodomésticos del estilo se configuran de manera similar.

Listado 3.2: Modelo Lavavajillas en DEVS

```
import logging
from xdevs.models import Atomic, Port
class Lavavajillas(Atomic):
    def __init__(self, name="Lavavajillas",
        consumo_por_hora: float = 1.2, duracion: float = 1.5):
        super().__init__(name)
        self.duracion: float = duracion
        self.consumo_por_hora: float = consumo_por_hora
        self.i_start = Port(int, "start")
        self.add_in_port(self.i_start)
        self.o_energy = Port(float, "energy")
        self.add_out_port(self.o_energy)
    def initialize(self):
        self.passivate()
    def exit(self):
        pass
    def lambdaf(self):
        if self.phase == "lavando":
            self.o_energy.add(self.consumo_por_hora)
    def deltint(self):
        if self.phase == "inicio":
            self.hold_in("lavando", self.duracion)
        elif self.phase == "lavando":
            self.passivate()
    def deltext(self, e):
        self.continuef(e)
        self.hold_in("inicio", 0.0)
```

- **Transductor:** Almacena la energía total, el consumo por hora y los picos de potencia. Funciona acumulando los valores de entrada y registrando las métricas por hora del día. El siguiente fragmento de código, [Listado 3.3](#), asegura una medición por hora simulada que permite el cálculo de los costes de las cargas que se necesitan para el optimizador:

Listado 3.3: Método deltext del Transducer

```
def deltext(self, e):
    self.continuef(e)
    hora_actual = int(self.clk) % 24
    self.clk += e
    energia_total_periodo = sum(self.i_energy.values)
    self.energy_t += energia_total_periodo
    self.energy_consumed += self.energy_t * e
    self.energia_por_hora[hora_actual] += energia_total_periodo
    if self.energy_peak < self.energy_t:
        self.energy_peak = self.energy_t
    self.passivate()
```

- **Modelo acoplado: Casa:** Esta parte del modelo agrupa todos los dispositivos y define cómo se conectan entre sí a través de acoplamientos, incluyendo el generador de eventos y

el transductor, tal como aparece en [Listado 3.4](#).

Listado 3.4: Modelo acoplado Casa

```
class Casa(Coupled):
    def __init__(self, name, file_path=None, events_list=None):
        super().__init__(name)
        if file_path is not None:
            self.generador = Generador("generador",
                                         file_path=file_path)
        elif events_list is not None:
            self.generador = Generador("generador",
                                         events_list=events_list)
        else:
            raise ValueError("provide events")
        self.lavadora = Lavadora()
        self.lavavajillas = Lavavajillas()
        self.coche = CargadorCoche()
        self.transducer = Transducer()
        self.add_component(self.generador)
        self.add_component(self.lavadora)
        self.add_component(self.lavavajillas)
        self.add_component(self.coche)
        self.add_component(self.transducer)
        self.add_coupling(self.generador.get_out_port("lavadora"),
                           self.lavadora.i_start)
        self.add_coupling(self.generador.get_out_port("lavavajillas"),
                           self.lavavajillas.i_start)
        self.add_coupling(self.generador.get_out_port("coche_start"),
                           self.coche.i_start)
        self.add_coupling(self.generador.get_out_port("coche_stop"),
                           self.coche.i_stop)
        self.add_coupling(self.lavadora.o_energy,
                           self.transducer.i_energy)
        self.add_coupling(self.lavavajillas.o_energy,
                           self.transducer.i_energy)
        self.add_coupling(self.coche.o_energy,
                           self.transducer.i_energy)
```

3.3.2. Algoritmo

Con el objetivo de encontrar un plan de carga eficiente para los distintos dispositivos de la casa, se ha optado por el algoritmo Simulated Annealing como técnica de optimización. Este algoritmo está inspirado en el proceso físico de enfriamiento de metales y se caracteriza por su capacidad para evitar quedar atrapado en óptimos locales al aceptar peores de forma controlada en las primeras fases de búsqueda [57]. El resultado de esta optimización es una minimización del coste energético total, teniendo en cuenta las tarifas eléctricas horarias y penalizando los picos de potencia que superen el umbral especificado y las demás restricciones especificadas por el usuario.

Entre las distintas metaheurísticas disponibles, SA fue seleccionada frente a otras alternativas como los AG por varias razones. En primer lugar, el algoritmo ha demostrado buen rendimiento

en problemas de planificación horaria similares al planteado en este trabajo. Por otra parte, a diferencia de los AG que requieren mantener y evaluar poblaciones completas de soluciones, SA permite trabajar sobre una única solución activa, reduciendo así de manera significativa la carga computacional del sistema. Asimismo, su estructura secuencial facilita la incorporación de restricciones personalizadas del usuario, sin necesidad de diseñar operadores genéticos complejos. Estas características hacen que SA hay sido el algoritmo seleccionado para este proyecto. El Algoritmo 1 detalla el funcionamiento de nuestro SA.

Algorithm 1 Implementación general del algoritmo optimizador Simulated Annealing. Adaptado de [58]

Require: T_{\max} (temperatura inicial), T_{\min} (temperatura mínima), E_{umbral} (umbral de energía), α (factor de enfriamiento)

Ensure: Mejor solución encontrada x

```

1:  $T \leftarrow T_{\max}$ 
2:  $x \leftarrow$  generar solución candidata inicial
3:  $E \leftarrow E(x)$  {calcular energía de la solución inicial}
4: while  $T > T_{\min}$  and  $E > E_{\text{umbral}}$  do
5:    $x_{\text{nueva}} \leftarrow$  generar nueva solución candidata
6:    $E_{\text{nueva}} \leftarrow E(x_{\text{nueva}})$ 
7:    $\Delta E \leftarrow E_{\text{nueva}} - E$ 
8:   if Aceptar( $\Delta E, T$ ) then
9:      $x \leftarrow x_{\text{nueva}}$ 
10:     $E \leftarrow E_{\text{nueva}}$ 
11:   end if
12:    $T \leftarrow T \cdot \alpha$  {enfriar la temperatura}
13: end while
14: return  $x$ 

```

En definitiva:

1. Se comienza definiendo una temperatura inicial T_{\max} , una temperatura mínima T_{\min} , un umbral de energía E_{umbral} y un factor de enfriamiento α . Se genera una primera solución candidata x y se evalúa su energía con la función de coste (E).
2. El algoritmo se queda en un bucle mientras se cumpla que $T > T_{\min}$ y $E > E_{\text{umbral}}$ se cumplen.
3. Se genera una nueva solución "vecina" x_{nueva} , ligeramente diferente de x , y se calcula su coste E_{nueva} .
4. Se calcula la diferencia de energía entre vecinos $\Delta E = E_{\text{nueva}} - E$.
 - Si la nueva solución es mejor ($\Delta E < 0$), esta se acepta.
 - Si es peor, se acepta con una probabilidad dependiente de la temperatura: $P = \exp(-\Delta E/T)$. Esto se hace para escapar de mínimos locales en las primeras fases de este proceso.
5. La temperatura se actualiza según $T \leftarrow T \cdot \alpha$, siendo α un factor menor que 1, haciendo así que el sistema se vuelva más restrictivo con el tiempo. Este proceso es lo que llamamos el enfriamiento.
6. El proceso continúa hasta que la temperatura alcanza un valor suficientemente bajo o se cumple el criterio de energía mínima.

7. Se devuelve la mejor solución encontrada.

Se ha adaptado este algoritmo a nuestro sistema de la siguiente manera ([Listado 3.5](#)):

Listado 3.5: Algoritmo de Recocido Simulado (`simulated_annealing`)

```
def simulated_annealing(temp_inicial=1000, temp_final=1, alfa=0.95,
                        iteraciones_por_temp=20,
                        hora_conexion=HORA_CONEXION,
                        hora_objetivo=HORA_OBJETIVO):
    actual = generar_individuo(hora_conexion, hora_objetivo)
    mejor = actual.copy()
    fitness_actual, energia_eur_actual,
    penalizacion_actual = evaluar_solucion(actual)
    coste_mejor = fitness_actual
    temp = temp_inicial
    while temp > temp_final:
        for _ in range(iteraciones_por_temp):
            vecino = generar_vecino(actual, hora_conexion, hora_objetivo)
            coste_vecino, energia_eur_vecino,
            penalizacion_vecino = evaluar_solucion(vecino)

            delta = coste_vecino - fitness_actual
            if delta < 0 or random.random() < math.exp(-delta / temp):
                actual = vecino
                fitness_actual = coste_vecino
                energia_eur_actual = energia_eur_vecino
                penalizacion_actual = penalizacion_vecino

            if fitness_actual < coste_mejor:
                mejor = actual.copy()
                coste_mejor = fitness_actual
        temp *= alfa
    return mejor
```

Para evaluar el *fitness* o la calidad de las soluciones contempladas se define el método `evaluar_solucion()`. En esta configuración de la herramienta se tienen varios aspectos en cuenta para evaluar una solución. Estos son los siguientes:

- La potencia utilizada no sobrepasa el límite de potencia contratada.
- La lavadora y el lavavajillas no comienzan después de una hora establecida. Esto puede ser para evitar el ruido en horas de descanso, o por cualquier otra preferencia del usuario.
- Ambos electrodomésticos no funcionan a la vez. Esta penalización no es necesaria, pero muestra cómo el sistema puede adaptarse a los requisitos específicos del hogar mediante nuevas restricciones.
- El coche no carga más horas de las estrictamente necesarias.

Teniendo en cuenta estas restricciones, se asocian penalizaciones a cada caso y se computa el total para obtener el *fitness* de cada solución. El código utilizado para ello queda recogido en el [Listado 3.6](#):

Listado 3.6: Función evaluar_solucion

```

def evaluar_solucion(solucion):
    coche_start, coche_stop, hora_lavadora, hora_lavavajillas = solucion
    posibles_horas = horas_validas(HORA_CONEXION, HORA_OBJETIVO)
    if coche_start not in posibles_horas or coche_stop not in
    posibles_horas:
        return float("inf"), float("inf"), float("inf")
    intervalo = calcular_intervalo_horas(coche_start, coche_stop)
    if intervalo < TIEMPO_CARGA_MINIMO or intervalo > len(posibles_horas):
        return float("inf"), float("inf"), float("inf")
    if not intervalo_dentro_del_rango(coche_start, coche_stop,
    posibles_horas):
        return float("inf"), float("inf"), float("inf")
    eventos = [
        f"{coche_start};coche_start!1",
        f"{hora_lavadora};lavadora!1",
        f"{hora_lavavajillas};lavavajillas!1",
        f"{coche_stop};coche_stop!1",
    ]
    casa = Casa("casa", events_list=eventos)
    coordinador = Coordinator(casa)
    coordinador.initialize()
    coordinador.simulate(200)
    coordinador.exit()
    transducer = casa.transducer
    energia_por_hora = transducer.energia_por_hora
    energia_peak = transducer.energy_peak
    coste_energia = sum(
        energia * tarifa for energia, tarifa in
        zip(energia_por_hora, TARIFAS_HORA)
    )
    penalizacion_pico = 0
    if energia_peak > LIMITE_PICO:
        penalizacion_pico = 100000 * (energia_peak - LIMITE_PICO)
    penalizacion_tiempo = 0
    if hora_lavadora + DURACION_LAVADORA > HORA_LIMITE_INICIO:
        penalizacion_tiempo += 1.0
    if hora_lavavajillas + DURACION_LAVAVAJILLAS > HORA_LIMITE_INICIO:
        penalizacion_tiempo += 1.0
    penalizacion_carga_larga = 0
    if intervalo > TIEMPO_CARGA_MINIMO:
        exceso = intervalo - TIEMPO_CARGA_MINIMO
        penalizacion_carga_larga = exceso * 1.0
    penalizacion_solapamiento = 0
    if hora_lavadora == hora_lavavajillas:
        penalizacion_solapamiento = 1.0
    fitness = coste_energia + penalizacion_pico +
    penalizacion_tiempo + \
        penalizacion_carga_larga + penalizacion_solapamiento
    penalizacion_total = penalizacion_pico + penalizacion_tiempo + \
        penalizacion_carga_larga +

```

```
penalizacion_solapamiento  
return fitness , coste_energia , penalizacion_total
```

En definitiva, esta implementación de un algoritmo SA nos permite dar un coeficiente de idoneidad a cada solución contemplada, teniendo en cuenta todas las restricciones indicadas por el usuario.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la implementación y evaluación del sistema HEMS propuesto. Se incluyen tanto la validación del algoritmo de optimización como su aplicación en un caso de estudio simulado, con el objetivo de cuantificar los beneficios en términos de ahorro energético.

4.1. Test de convergencia

Una vez definido el funcionamiento de la herramienta propuesta, y desarrollado una GUI que permite a los usuarios hacer uso de ella, plantemos un test de convergencia que evalúe la eficiencia de nuestra solución.

Este test de convergencia tiene como objetivo analizar cómo evoluciona la calidad de las soluciones obtenidas por el algoritmo propuesto a lo largo de las iteraciones. Este análisis permite observar en qué momento el algoritmo deja de mejorar significativamente sus resultados, identificando así un posible punto de saturación en la búsqueda [59]. Para ello, se monitoriza la evolución del mejor valor de la función de *fitness* encontrado por el algoritmo en cada iteración. Se ejecutan varias simulaciones, en este caso cinco, con el objetivo de evaluar la estabilidad y velocidad de convergencia del algoritmo, facilitando la elección de un número de iteraciones adecuado que optimice el equilibrio entre precisión y tiempo de cómputo.

Para la configuración del test, se hace uso de un escenario base para un hogar equipado con varios dispositivos programables, un perfil de conexión entre las 18:00 y las 23:00, y tarifas energéticas que distinguen entre periodos valle, llano y punta como las presentadas anteriormente. Las restricciones también son las indicadas en secciones anteriores. Se utiliza la librería *matplotlib* para visualizar la gráfica resultante.

El código utilizado es el presentado en [Listado 4.1](#):

Listado 4.1: Convergencia del algoritmo de Recocido Simulado

```
def simulated_annealing_tracking(temp_inicial=1000, temp_final=1,
    alfa=0.95, iteraciones_por_temp=20, hora_conexion=HORA_CONEXION,
    hora_objetivo=HORA_OBJETIVO):
    actual = generar_individuo(hora_conexion, hora_objetivo)
    mejor = actual.copy()
    fitness_actual, -, - = evaluar_solucion(actual)
    fitness_mejor = fitness_actual
    temp = temp_inicial
    historico_mejores = []
```

```

while temp > temp_final:
    for _ in range(iteraciones_por_temp):
        vecino = generar_vecino(actual, hora_conexion, hora_objetivo)
        fitness_vecino, _, _ = evaluar_solucion(vecino)
        delta = fitness_vecino - fitness_actual
        if delta < 0 or random.random() < math.exp(-delta / temp):
            actual = vecino
            fitness_actual = fitness_vecino
            if fitness_actual < fitness_mejor:
                mejor = actual.copy()
                fitness_mejor = fitness_actual
            historico_mejores.append(fitness_mejor)
    temp *= alfa
return historico_mejores

```

La gráfica resultante queda recogida en la Figura 4.1.

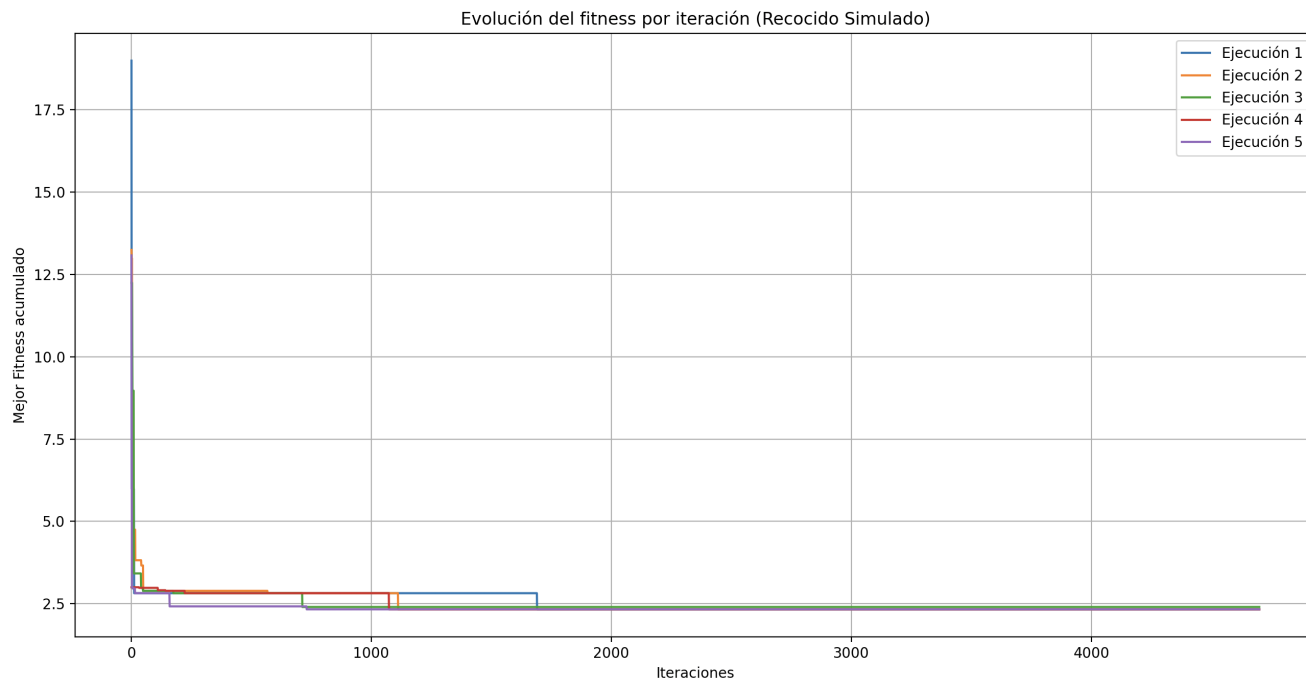


Figura 4.1: Evolución del mejor valor de fitness por iteración

En la figura se muestra la evolución del mejor valor de la función de *fitness* alcanzado por el algoritmo SA a lo largo de las iteraciones, en cinco ejecuciones independientes. Se observa que en las primeras iteraciones, especialmente antes de las 500 primeras, se produce una rápida disminución del *fitness*, lo que indica que el algoritmo encuentra soluciones significativamente mejores en las fases iniciales del proceso. A partir de ese punto, las mejoras son cada vez más esporádicas, tendiendo a estabilizarse hacia valores cercanos a 2.5 en todas las ejecuciones. Este valor corresponde a una métrica combinada de coste energético total y penalizaciones por incumplimiento de restricciones. Esta convergencia temprana sugiere que, a partir de 1500 iteraciones, el algoritmo muestra una tendencia a estabilizarse, aportando mejoras marginales que podrían no justificar el coste computacional adicional.

Este análisis resulta útil para optimizar el tiempo de ejecución del algoritmo, ya que permite identificar un número de iteraciones suficiente para obtener soluciones de buena calidad sin generar costes computacionales innecesarios. Por lo tanto, se concluye que para nuestra herramienta

un límite de 1500-2700 iteraciones es adecuado para garantizar una convergencia eficiente del algoritmo.

A partir de este test se concluyen los parámetros de la tabla 4.1 como los más adecuados para la solución propuesta:

Tabla 4.1: Parámetros utilizados en la implementación del algoritmo SA

Parámetro	Valor	Descripción
Temperatura inicial T_0	1000	Valor inicial alto que permite explorar el espacio de soluciones sin restricciones iniciales.
Temperatura final T_{final}	1	Umbral que determina la condición de parada del proceso de enfriamiento.
Factor de enfriamiento α	0.95	Factor multiplicativo para reducir la temperatura en cada ciclo.
Iteraciones por temperatura	20	Número de soluciones generadas por cada valor fijo de temperatura.
Iteraciones totales (aprox.)	2700	Derivado del número de ciclos necesarios para alcanzar T_{final} desde T_0 , con el esquema de enfriamiento definido. ¹

Además de la validación técnica del algoritmo propuesto y sus resultados en términos de convergencia, cabe destacar la relevancia práctica de esta herramienta para los usuarios.

4.2. Estudio de caso: ahorro generado por el uso de la herramienta HEMS

Con el objetivo de evaluar el impacto práctico de la herramienta desarrollada, se plantea una comparativa entre el precio que supondría para el usuario cargar todos sus dispositivos a la hora de entrada a la casa, frente al coste generado si el usuario siguiera el plan de carga presentado por la herramienta. Para este análisis no se tienen en cuenta restricciones ni penalizaciones para el cálculo del escenario sin optimización.

- **Escenario sin optimización:** todos los dispositivos comienzan su funcionamiento a las 18:00.

- Coche eléctrico: 18:00–21:00 → tarifa: 0,19 €/kWh
- Lavadora: 18:00–20:00 → tarifa: 0,19 €/kWh
- Lavavajillas: 18:00–19:30 → tarifa: 0,19 €/kWh

Coste total estimado: 1,79 €

- **Escenario con optimización:** se emplea SA para determinar un plan de carga más beneficioso.
- Coche eléctrico: 22:00–01:00 → tarifa: 0,07 €/kWh

¹Dado que la temperatura se actualiza como $T_{k+1} = \alpha \cdot T_k$, se necesitan aproximadamente 135 ciclos para que $T < T_{\text{final}}$ con $T_0 = 1000$, $T_{\text{final}} = 1$ y $\alpha = 0,95$. Esto implica un total aproximado de $135 \times 20 = 2700$ iteraciones.

- Lavadora: 20:00–22:00 → tarifa: 0,13 €/kWh
- Lavavajillas: 22:00–23:30 → tarifa: 0,07 €/kWh

Coste total estimado: 0,71 €

Para el planteamiento de estos escenarios se han tenido en cuenta la duración de encendido de cada dispositivo. Se ha utilizado las 18h, ya que es una hora. Los costes energéticos diarios estimados en ambos escenarios se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Comparativa del coste energético diario con y sin optimización

Escenario	Coste estimado (€)	Ahorro (%)
Sin optimización	1.79	–
Con optimización (SA)	0.71	60.3

Es decir, el uso de la herramienta propuesta permite reducir el coste diario de 1.79€ a 0.71€, representando un ahorro aproximado del 60 %. Esto se da como consecuencia del desplazamiento del consumo eléctrico hacia franjas horarias con tarifas más económicas. Cabe destacar que el ahorro sería mayor si se tuviera en cuenta el impacto de penalizaciones asociadas a restricciones como no utilizar los electrodomésticos a la vez.

En definitiva, utilizando el sistema propuesto no sólo se contribuye a la distribución de la demanda de consumo eléctrico, aliviando así la presión de la red eléctrica, sino que también supone un ahorro directo para el usuario.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

La utilidad de esta herramienta se manifiesta en varios niveles. A nivel individual, permite al usuario reducir sus costes energéticos mediante una gestión automatizada que se adapta a tarifas dinámicas, y evita picos de consumo y otras restricciones penalizadas. A nivel colectivo, contribuye a una demanda más distribuida, evitando sobrecargas en la red eléctrica y fomentando el consumo en horas valle, lo que beneficia tanto a los operadores del sistema como al conjunto del sistema energético.

Desde el punto de vista de las ciudades conectadas o inteligentes, esta herramienta representa un componente clave dentro de una infraestructura energética más amplia. Su integración con dispositivos IoT, medidores inteligentes y plataformas de gestión energética permite la creación de hogares que interactúan dinámicamente con la red, ajustando su consumo en función del contexto tarifario, de señales de demanda o incluso de previsiones meteorológicas asociadas a la producción renovable.

En un paso futuro, este tipo de soluciones podrán formar parte de sistemas de respuesta activa a la demanda, agregación de consumos domésticos para mercados energéticos locales y micro redes, o coordinación con comunidades energéticas. En decir, el aporte no se limita a la optimización local de un hogar, sino que se vela por una visión más global de sostenibilidad y autonomía energética.

En definitiva, la herramienta desarrollada cumple los objetivos identificados tras explorar los trabajos y soluciones disponibles en esta área de trabajo. Se logra la implementación de un optimizador de consumo energético doméstico basado en técnicas de simulación DEVS y algoritmos de búsqueda SA. Para ello, se modela el comportamiento de dispositivos eléctricos (cargador de coche, lavadora y lavavajillas) y se desarrolla una optimización que considera tanto el coste energético como penalizaciones varias. Además, se proponen análisis de convergencia para ajustar los parámetros del algoritmo, mejorando así su eficiencia y realizando una validación técnica de la solución.

Los resultados obtenidos permiten a los usuarios lograr un uso energético más eficiente, permitiendo así la generación de ahorro tanto para estos como para las distribuidoras energéticas, además de facilitar una distribución más óptima del consumo eléctrico. En definitiva, este proyecto no solo ha cumplido con los objetivos propuestos, sino que también establece una base sólida para futuras ampliaciones y ofertas más completas.

5.0.1. Limitaciones

Cabe indicar que la eficiencia de esta herramienta viene condicionada por la capacidad de conectividad de los dispositivos del usuario. Es decir, para poder ejecutar el plan de carga propuesto



Figura 5.1: Mock-ups interfaz de usuario

por esta herramienta es necesario la existencia de una panel de control a los que los dispositivos a gestionar estén conectados, y que permita su control en remoto. Esto se trata de un condicionante muy limitante, que si bien se verá disminuido por la alta penetración en el mercado de dispositivos inteligentes conectados, a fecha actual resulta una barrera de adopción importante. Sin embargo, en los casos en los que esta gestión a distancia de los dispositivos no sea posible, esta herramienta puede servir como un sistema de recomendaciones que el usuario puede decidir utilizar para así sacar los beneficios de esta carga más económica.

Por otra parte, la implementación actual está limitada a un hogar específico, sin embargo, si la solución se expendiese a un núcleo energético mayor, como una comunidad energética, sería necesario escalar de manera acorde la capacidad computacional de la solución. Esto es puesto que cada iteración del optimizador requiere de una simulación completa del comportamiento energético del sistema, lo que implica una mayor complejidad y tiempo de cómputo a medida que se incrementa el número de dispositivos y de restricciones a considerar. En ese contexto, podrían explorarse estrategias de paralelización, o el uso de técnicas de evaluación aproximada para mantener tiempos de respuesta razonables sin comprometer la calidad de las soluciones.

5.0.2. Trabajo futuro

La interfaz de usuario aquí planteada es bastante sencilla puesto que los objetivos de este trabajo buscaban desarrollar un primer diseño que permita al usuario interactuar con la herramienta, pero si se quisiera dotar de más sofisticación a la interfaz se proponen los mock-ups de la figura 5.1. En esta propuesta de interfaz, el usuario cuenta con dos pantallas principales a las que gana acceso una vez ha pasado por las dos primeras páginas de bienvenida. La primera recoge todos los dispositivos del usuario, permitiendo vincular nuevos. Para que estos se puedan añadir a nuestro gestor de energía inteligente es necesario que los dispositivos estén previamente conectados con el panel de control central de la casa, para asegurar que estos sean controlables de manera remota y que seamos capaces de recolectar datos de los mismos. En la parte baja de la pantalla se encuentra el plan de carga formulado según las preferencias del usuario, para que el cliente esté informado de los detalles de carga de sus electrodomésticos y/o vehículos. En la segunda pantalla, el usuario puede ver sus ahorros generados en el último mes, que se calcularían simulando el coste de la carga de los dispositivos en las horas picos frente al coste real generado, y, además, incluye un calendario de uso de la herramienta para que entienda mejor la relación de su uso con el ahorro generado.

Por otra parte, al no contar con datos en tiempo real, el usuario debe indicar manualmente el tiempo de llegada del vehículo. No obstante, una vez que esta herramienta esté conectada a un panel de control de hogar que tenga conexión directa a los coches vinculados, esto no será necesario. Se propone entonces esta funcionalidad para una versión conectada de esta herramienta.

Finalmente, como se ha mencionado en secciones anteriores de este trabajo, la escalabilidad de esta herramienta está diseñada para que este sistema se aplique a contextos energéticos más amplios, dando cobertura a redes de hogares más extensas y pudiendo albergar un mayor número de restricciones. Queda, por tanto, abierta la posibilidad de implementar esta solución a integraciones más complejas.

Bibliografía

- [1] Futured, “Flexibilidad en redes de distribución eléctrica,” 2024. [Online]. Available: <https://futured.es/wp-content/uploads/2024/05/Documento-Futured-Flexibilidad-en-Redes-de-Distribucion-Elctrica.pdf>
- [2] Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. (2022) Estrategia de desarrollo sostenible 2030. [Online]. Available: <https://www.dsca.gob.es/sites/default/files/derechos-sociales/eds-cast-acce.pdf>
- [3] “Energy consumption in households,” Eurostat, Tech. Rep., 2023. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/58200.pdf>
- [4] (2024) Spain: Energy efficiency profile. Odyssee-MURE Project. Efficiency Trends and Policies Profiles. [Online]. Available: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-trends-policies-profiles/spain.html>
- [5] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2025) Objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/objetivos.html#:~:text=A%20su%20vez%2C%20la,conjunto%20de%20toda%20la%20econom%C3%ADa.>
- [6] Pacto Mundial. (2025) Desarrollo sostenible: Tejiendo la agenda 2030 en España. [Online]. Available: <https://www.pactomundial.org/noticia/desarrollo-sostenible-tejiendo-la-agenda-2030-en-espana/#agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible>
- [7] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, “Plan nacional integrado de energía y clima 2021-2030,” 2021. [Online]. Available: <https://energia.gob.es/es-es/Paginas/PNIEC.aspx>
- [8] Red Eléctrica de España, “La gestión de la demanda en el sistema eléctrico español,” 2022. [Online]. Available: <https://www.ree.es/es/sostenibilidad/gestion-de-la-demanda>
- [9] CORDIS. (2023) Predicción de las fluctuaciones en la generación de energía renovable. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/article/id/436645-predicting-fluctuations-in-renewable-energy-generation/es>
- [10] S. Impram, S. V. Neş, and B. Oral, “Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 31, p. 100539, 2020. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:225304805>
- [11] M. M. Rahman, S. H. Dadon, M. He, M. Giesselmann, and M. M. Hasan, “An overview of power system flexibility: High renewable energy penetration scenarios,” *Energies*, 2024. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:274924755>

- [12] S. Shahzad and E. Jasińska, “Renewable revolution: A review of strategic flexibility in future power systems,” *Sustainability*, vol. 16, no. 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/13/5454>
- [13] Enel X Corporate. (2025) What is demand response and how does it work? [Online]. Available: <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-demand-response-how-does-it-work>
- [14] IBM. (2025) ¿qué es el iot? [Online]. Available: <https://www.ibm.com/es-es/topics/internet-of-things>
- [15] M. Saffarie and K. Rahseparfard, “A survey on iot-based smart-grid overview,” 02 2023, pp. 105–114.
- [16] T. Domínguez-Bolaño, O. Campos, V. Barral, C. J. Escudero, and J. A. García-Naya, “An overview of iot architectures, technologies, and existing open-source projects,” *Internet of Things*, vol. 20, p. 100626, 2022.
- [17] M. Rahmani-Andebili, “Home energy management systems: A review of modelling and complexity,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/309229022_Home_Energy_Management_Systems_A_Review_of_Modelling_and_Complexity
- [18] B. P. Zeigler, A. Muzy, and E. Kofman, *Theory of modeling and simulation: discrete event & iterative system computational foundations*. Academic Press, 2018.
- [19] J. L. Risco-Martín, S. Mittal, K. Henares, R. Cardenas, and P. Arroba, “xDEVS: A tool-kit for interoperable modeling and simulation of formal discrete event systems,” *Software: Practice and Experience*, vol. 53, no. 3, pp. 748–789, 2023.
- [20] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, “Optimization by simulated annealing,” *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- [21] L. F. Restrepo Betancur, “Crecimiento poblacional urbano a nivel mundial en las últimas seis décadas,” *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, vol. 44, no. 1, pp. 277–295, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5209/aguc.94213>
- [22] J. M. Moreno. Tendencias energéticas 2025: lo que se viene este año. Cueva Energía. [Online]. Available: <https://cuervaenergia.com/es/comunidad/innovacion/tendencias-energeticas-para-este-2025/>
- [23] F. M. Valgrai y el clúster de energía reúnen a especialistas para trazar el futuro del sector energético con inteligencia artificial. Fundación ValgrAI. [Online]. Available: <https://valgrai.eu/es/2025/03/27/valgrai-y-el-cluster-de-energia-reunen-a-especialistas-para-trazar-el-futuro-del-sector-energetico-con-intel>
- [24] M. Grieves and J. Vickers, *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*, 08 2017, pp. 85–113.
- [25] A. Kalaida and M. Pan, “Creating digital twins of smart buildings on the azure digital twins platform,” *Municipal economy of cities*, vol. 6, pp. 2–7, 12 2024.
- [26] P. enerTIC.org. Np: enertic identifica las grandes tendencias de 2025 en digitalización para la sostenibilidad. [Online]. Available: <https://enertic.org/np-enertic-identifica-las-grandes-tendencias-de-2025-en-digitalizacion-para-la-sostenibilidad/>

- [27] S. C. Cluster, “Informe de tendencias 2025,” Smart City Cluster, Dossier. [Online]. Available: <https://smartcitycluster.org/wp-content/uploads/2025/01/DOSSIER-TENDENCIAS-2025.pdf>
- [28] P. de Arriba Segurado, “Informe nacional de eficiencia energética: España,” Odyssee-MURE Project, Tech. Rep., 2024. [Online]. Available: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/espana-eficiencia-energetica.pdf>
- [29] P. Mir-Artigues and P. Del Rio, “Prosumers’ behavior under a regulation that encourages strict self-sufficiency. the case of spanish photovoltaic micro-generation,” p. 1114, 02 2021.
- [30] (2021) La ley de cambio climático y transición energética es ya una realidad. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (Gobierno de España). [Online]. Available: <https://esmovilidad.transportes.gob.es/noticias/la-ley-de-cambio-climatico-y-transicion-energetica-es-ya-una-realidad>
- [31] LCP Delta, “How can energy retailers become the leading players in the hem market?” p. 31, 09 2024.
- [32] Iberdrola, “Flexibilidad en el sistema eléctrico,” <https://www.iberdrola.com/innovacion/flexibilidad-sistema-electrico>, 2024.
- [33] Cuerva Energía, “Flexibilidad energética,” <https://cuervaenergia.com/es/comunidad/nuevos-roles-de-la-energia/flexibilidad-energetica/>, 2024.
- [34] E. P. de la Energía, “Europa desperdicia su capacidad eléctrica por falta de flexibilidad en la red,” <https://elperiodicodelaenergia.com/europa-desperdicia-su-capacidad-electrica-por-falta-de-flexibilidad-en-la-red/>, 2024.
- [35] CORDIS, “Las centrales eléctricas virtuales y los mercados de flexibilidad orquestan el paso a una producción consciente de la red,” <https://cordis.europa.eu/article/id/451906-virtual-power-plants-and-flexibility-markets-orchestrate-the-shift-to-grid-aware-producti/es>, 2024.
- [36] —, “Facilitación de la participación: liberar el potencial de la flexibilidad energética,” <https://cordis.europa.eu/article/id/449486-facilitating-participation-unleashing-energy-flexibility-s-potential/es>, 2024.
- [37] IRENA, “Flexibilidad del sistema eléctrico: el papel cambiante del operador del sistema. parte i: Conceptos, herramientas y metodologías,” https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_Part_I_ES.pdf, 2018.
- [38] R. Lasseter, “Microgrids,” in *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, vol. 1, 2002, pp. 305–308 vol.1.
- [39] M. Pipattanasomporn, H. Feroze, and S. Rahman, “Multi-agent systems for drems (distribution real-time energy management systems),” in *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 2009, pp. 1–8.
- [40] G. A. Wainer and R. Castro, “The application of the devs formalism to the simulation of computer networks: A survey and new trends,” *Simulation Notes Europe (SNE)*, vol. 23, no. 3-4, pp. 119–130, 2013.
- [41] Y. Liu and G. A. Wainer, “Applying DEVS to formal specification of network protocols,” in *Proceedings of the 2008 Spring simulation multiconference*. Society for Modeling & Simulation International, 2008, pp. 44–51.

- [42] A. T. Al-Hammouri, B. P. Zeigler, J. J. Nutaro, D. E. Silver, and M. L. Kempker, “Devs-based modeling and simulation of power systems,” in *Proceedings of the 2007 summer computer simulation conference*. Society for Computer Simulation International, 2007, pp. 683–689.
- [43] J. J. Nutaro, “An acausal devs model of electrical grids,” *SIMULATION*, vol. 86, no. 5-6, pp. 355–369, 2010.
- [44] E.-G. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*. John Wiley & Sons, 2009.
- [45] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and T. Z. Shun, “Demand side management in smart grid using heuristic optimization,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1244–1252, 2012.
- [46] B. Rajasekhar, R. R. Gounden, C. Subramani, and S. R. Salkuti, “Simulated annealing based optimal energy management of smart grid with plug-in hybrid electric vehicle,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 26, p. 100445, 2021.
- [47] SC Edison. (2025) Programas de respuesta a la demanda para hogares. [Online]. Available: <https://www.sce.com/es/residential/demand-response>
- [48] PG&E. (2025) Programas de respuesta a la demanda (demand response, dr). [Online]. Available: <https://www.pge.com/es/save-energy-and-money/energy-saving-programs/demand-response-programs.html>
- [49] Trane. (2025) Respuesta de la demanda. [Online]. Available: <https://www.trane.com/commercial/latin-america/sv/es/services/energy-and-sustainability/active-energy-management/demand-response.html>
- [50] Google. (2025) Google home. [Online]. Available: https://home.google.com/intl/es_es/welcome/
- [51] Amazon. (2025) Alexa smart home. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/b?ie=UTF8&node=21442899011>
- [52] BSH Electrodomésticos. (2025) Home connect. [Online]. Available: <https://www.bsh-group.com/es/marcas-y-productos/home-connect#:~:text=Home%20Connect%20%7C%20BSH%20Electrodom%C3%A9sticos%20Espa%C3%B1a>
- [53] Octopus Energy España, “Intelligent octopus go: la nueva tarifa de octopus energy para cargar el coche eléctrico en casa a precio de capuccino,” 2024. [Online]. Available: <https://octopusenergy.es/intelligent-octopus-go-la-nueva-tarifa-de-octopus-energy-para-cargar-el-coche-electrico-en-casa-a-precio-c>
- [54] Iberdrola2025, “Asistente smart: el aliado para mejorar tu eficiencia energética,” 2025. [Online]. Available: <https://www.iberdrola.es/eficiencia-energetica/asistente-smart-avanzado>
- [55] A. L. Bidegain, “Optimizador de consumo energético doméstico con simulación devs y recocido simulado,” <https://github.com/ainaralarbi/tfm-ainara.git>, 2025.
- [56] A. Fard, S. Makki, and N. Ghasem-Aghaei, “A simulated annealing-based meta-heuristic algorithm to solve the multi-objective flexible job-shop scheduling problem,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 79, no. 31–32, pp. 29 821–29 849, 2020. [Online]. Available: <https://sci-hub.st/10.1007/s11042-020-09186-w>
- [57] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, “Optimization by simulated annealing,” *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983. [Online]. Available: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.220.4598.671>

- [58] Baeldung, “Simulated annealing - baeldung on computer science,” <https://www.baeldung.com/cs/simulated-annealing>, 2021.
- [59] KeepCoding, “Criterios de convergencia en data mining,” <https://keepcoding.io/blog/criterios-de-convergencia-en-data-mining/>, 2023.