

# **Inteligencia computacional y prototipo de controlador de eficiencia energética para hogares**

Emilio Orsi

5 de diciembre de 2016



---

## RESUMEN

---

Este proyecto estudia el problema de gestión de la demanda de energía eléctrica para un grupo de hogares. Se presenta una investigación para el diseño de una solución completa al problema planteado, que incluye la definición del hardware y del software a utilizar. Se desarrolló un prototipo de controlador de hogares para eficiencia energética con capacidad de ser monitoreado y controlado remotamente utilizando una plataforma web como canal de comunicación. Asimismo, se implementó un sistema de gestión con capacidad de administrar el consumo de los dispositivos eléctricos hogareños mediante la planificación de los controladores de hogares. El sistema de gestión desarrollado permite incorporar algoritmos computacionales para administrar el consumo de los dispositivos hogareños mediante el uso de una interfaz de programación. Además, se diseñó e implementó un protocolo de comunicación para planificar los controladores de hogares con foco en minimizar el flujo de mensajes a través de la red de datos. Finalmente, se desarrolló un algoritmo ávido para la definición de las acciones sobre los dispositivos hogareños con foco en la disminución del consumo de energía eléctrica. Los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas sobre el algoritmo desarrollado muestran que se puede disminuir el consumo de energía eléctrica de un termotanque hasta un 38.9 %, considerando un escenario simulado con un único uso diario. Los resultados exitosos obtenidos a partir de la solución desarrollada demuestran que el enfoque utilizado en este proyecto es útil para la reducción de consumo de energía eléctrica en los hogares.

Palabras claves: Redes inteligentes, gestión de la demanda, optimización, Internet de las cosas.



---

## ÍNDICE GENERAL

---

1	INTRODUCCIÓN	11
2	EL PROBLEMA DE LA GESTIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA	15
2.1	Motivación	15
2.2	Clasificación de artefactos hogareños	17
2.3	Comunicación y gestión de datos	19
2.4	Control y Monitoreo De Las Cargas Hogareñas	19
3	TRABAJOS RELACIONADOS	21
3.1	Impacto De La Utilización De Unidades De Microgeneración En Hogares	21
3.2	Reducción De Tarifas Mediante El Control De Cargas Desplazables	22
3.3	Clasificación De Los Distintos Tipo De Cargas Hogareñas	23
3.4	Solución Multiobjetivo Al Problema De La Gestión De La Demanda	25
3.5	Resumen	26
4	DESARROLLO DEL CONTROLADOR DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN HOGARES	29
4.1	Análisis y Definición Del Hardware Del Controlador De Hogares	29
4.2	Conexiones Entre Las Componentes Del Controlador	31
4.3	Protocolo De Comunicación Entre Las Componentes Del Controlador	34
4.3.1	Integración con el medidor stpm01/10	34
4.3.2	Integración con la unidad de distribución de potencia (Power Distribution Unit, PDU) Cyberpower	37
4.4	Prototipo Del Controlador De Hogares	38
4.5	Alternativas De Diseño e Implementación Del Controlador	41
4.5.1	Diseño Del Controlador	41
4.5.2	Descripción del framework Django e Implementación del Controlador de Hogares	43
4.6	Software Para La Administración Del Controlador	43
5	DESARROLLO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE LA DEMANDA E INTEGRACIÓN CON KHIMO	45
5.1	Introducción Al Problema De La Comunicación y Gestión De Los Datos	45
5.2	Arquitectura De La Solución Al Problema De Gestión De La Demanda	46
5.2.1	Khimo	47
5.2.2	EFEN	47
5.3	Módulo Central de Gestión EFEN	47
5.3.1	Principales funcionalidades ofrecidas por EFEN	48
5.3.2	Diseño de EFEN	50
5.3.3	Herramientas utilizadas para la implementación de EFEN	52

5.4	Protocolo De Integración con Khimo	52
5.4.1	Requerimientos de Efen_proto	52
5.4.2	Implementación de Efen_proto	53
5.5	Facilidades para el Procesamiento de los Datos de Consumo	53
6	DEFINICIÓN DE LA AGENDA DE ACCIONES	55
6.1	El Problema De La Definición De La Agenda De Acciones	55
6.2	Perfiles Y Ciclos De Consumo De Las Cargas Hogareñas	58
6.3	Métricas Para La Evaluación De Una Agenda De Acciones	60
6.4	Algoritmo Para La Definición De La Agenda De Acciones	60
6.4.1	Definición de la Agenda de Acciones	60
6.4.2	Evaluación del algoritmo desarrollado para la definición de la agenda de acciones	62
7	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	67
7.1	Conclusiones	67
7.2	Trabajo Futuro	69

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1	Redistribución del consumo en una región para disminuir picos de consumo de energía eléctrica.	16
Figura 2	Clasificación de las cargas hogareñas respecto al consumo de energía eléctrica y su comportamiento (en base al gráfico presentado en [23]).	24
Figura 3	Conexiones entre la placa RaspberryPi y el módulo con relé.	31
Figura 4	Placa de evaluación stevalipe016v1 para el micro stpm01/10.	32
Figura 5	Conexiones para la comunicación entre el RaspberryPi (RPI) y el stpm01/10.	33
Figura 6	Especificación del protocolo de lectura de los registros del chip stpm01/10.	35
Figura 7	Registros internos utilizados por el stpm01/10.	36
Figura 8	Reordenamiento de los bytes enviados por el stpm01/10.	37
Figura 9	Prototipo de controlador de hogares.	39
Figura 10	Diagrama de clases del controlador de hogares.	42
Figura 11	Arquitectura del sistema de gestión de la demanda.	46
Figura 12	Modelo del comportamiento de una carga interrumpible que manipula calor, donde se refleja el consumo y el tiempo requerido para culminar la tarea en cada etapa.	51
Figura 13	Relación entre las agendas de acciones y el costo de la energía eléctrica.	56
Figura 14	Perfil de consumo de un termotanque de 30 litros clase A con temperatura objetivo de 50 grados.	58
Figura 15	Perfil de consumo de una heladera con freezer clase A.	59
Figura 16	Consumo simulado para un termotanque utilizado una vez al día.	64
Figura 17	Predicción del consumo de las cargas administradas en base a la agenda de acciones definida por EFEN.	66



---

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1	Relación entre la categoría de las cargas y la disconformidad del usuario frente a su manipulación automática.	18
Tabla 2	Resumen de los trabajos relacionados revelados en el marco del proyecto.	27
Tabla 3	Probabilidad de uso de una carga en la semana.	49
Tabla 4	Comparación del costo y tiempo de uso entre dos agendas de acciones para la misma carga.	57
Tabla 5	Resumen de las características de las cargas definidas en EFEN.	65



---

## INTRODUCCIÓN

---

El concepto de red eléctrica inteligente (smart grid) propone la utilización de tecnologías de la información y las comunicaciones con el fin de mejorar la calidad y el desempeño de las redes eléctricas, de forma de aumentar la eficiencia, robustez y adaptabilidad de la red en su conjunto [20, 22]. Este tipo de práctica suele aplicarse en redes eléctricas cuya corriente es generada mediante energías renovables poco predecibles, como son la energía eólica y la solar. El buen uso y aprovechamiento de la energía eléctrica es fundamental, no sólo para obtener un beneficio económico, sino también para lograr una mejora en el cuidado del medio ambiente y un mejor aprovechamiento de los recursos naturales.

En este contexto, y con el fin de mejorar el nivel de vida de los ciudadanos y la calidad de la red eléctrica, numerosas ciudades han implantado infraestructuras que favorecen el uso eficiente de los recursos naturales para generar energía eléctrica tanto a nivel regional (macro) como a nivel de hogar (micro) [15].

A nivel macro, energías renovables como la solar y la eólica están siendo conectadas a la red de distribución eléctrica como parte de un esfuerzo mundial por reducir los efectos de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera [21]. Por otro lado, y dado que la energía eléctrica utilizada en las redes de alta tensión (corriente alterna) no es almacenable en su estado natural, es necesario mantener un balance entre el consumo y la producción de dicha corriente. Por esta razón, la incorporación de energía eléctrica producida a partir de energía solar o eólica implica añadir incertidumbre en cuanto a la capacidad de abastecimiento de energía eléctrica [14]. Esta incertidumbre presenta uno de los mayores retos en términos de operación del sistema a la hora de buscar mantener un nivel satisfactorio en el servicio eléctrico.

A nivel micro, el almacenamiento y generación de energía permite obtener beneficios económicos basados en el almacenamiento de la energía generada en horas de bajo costo, para luego ser utilizada o ser volcada a red eléctrica en horas de mayor demanda [7]. Sin embargo, la inestabilidad de las energías renovables utilizadas afecta a la red eléctrica con fluctuaciones de voltaje, cambios de corriente y frecuencia, haciendo necesaria la utilización de técnicas de gestión del consumo y de la generación de energía [7].

La gestión automática de la energía a niveles macro y micro no es una tarea sencilla. Para garantizar una buena calidad de servicio al cliente y que a su vez se obtenga una mejora significativa en la distribución de energía, es necesario aplicar modelos matemáticos y algoritmos computacionales que permitan definir el comportamiento de las cargas controladas para un período de tiempo determinado [16]. Adicionalmente, es necesario un soporte de hardware específico que permita la medición y la gestión

del consumo a través de la utilización de sensores, comunicación de datos y dispositivos de control. Estos dispositivos deben ser capaces de comunicarse entre sí y con un servidor central, para responder de forma inmediata a las diferentes situaciones que pueden darse de forma dinámica (incrementos de consumo, disminución de generación, incremento de precios de generación, etc.). De ese modo, los dispositivos de control permiten implementar estrategias de planificación de la red eléctrica que posibiliten un mejor aprovechamiento de recursos y puedan garantizar la viabilidad de utilizar energía eléctrica generada a partir de energías renovables poco predecibles.

Dado que el consumo de un único hogar es despreciable respecto al total de energía eléctrica producida, es necesario modificar el consumo de un número importante de hogares para condicionar el flujo total de la red eléctrica. Este enfoque permite mantener la calidad del servicio otorgado a cada hogar ya que se pretende modificar levemente el consumo de numerosos hogares.

La comunicación requerida para el control de numerosos hogares implica la transmisión de un gran flujo de datos, siendo de suma importancia la consideración de dicho flujo al momento de diseñar una solución al problema de gestión de la demanda de energía eléctrica.

Actualmente, los actores involucrados en el servicio de energía eléctrica poseen un conocimiento muy limitado sobre la utilización del recurso; en general, se desconoce en qué se está utilizando, ya sea 'invirtiendo' o 'malgastando', la energía. Disponer de infraestructura que permita obtener dicha información y de técnicas inteligentes de planificación y gestión del consumo es fundamental para mejorar el servicio.

El proyecto propone el estudio de estrategias computacionales para la planificación del consumo de energía eléctrica en hogares. En concreto, el proyecto propone atacar el problema de planificación de consumo de dispositivos eléctricos en diversos niveles urbanos (edificio, barrio, ciudad, etc.), aplicando estrategias de optimización y control para la gestión eficiente de la energía.

Por una parte, se aborda el estudio de técnicas y herramientas de inteligencia computacional para analizar las características de consumo energético a diversos niveles urbanos. Asimismo, se estudian mecanismos para la integración del conocimiento recabado en herramientas de gestión y planificación que incluyan algoritmos inteligentes.

Por otra parte, se propone el diseño e implementación de un controlador de eficiencia energética en hogares (de ahora en más controlador de hogares) que permita la gestión inteligente del consumo de dispositivos eléctricos en el hogar, contemplando la utilización de hardware de bajo costo mediante el uso de kits de desarrollo.

Las metodologías a aplicar para resolver el problema propuesto involucran:

- El estudio del estado del arte de tecnologías vinculadas a smart grid y definición del hardware a utilizar para prototipar un controlador de hogares.
- La elaboración de un prototipo de controlador de hogares y desarrollo del software necesario para la medición de consumo energético y control de dispositivos.
- La adaptación de la biblioteca de software Khimo (aplicación web de la empresa Ikatu, <http://www.ikatu.com/>) para el monitoreo y control remoto del hardware previamente elaborado.

- La extensión de Khimo incorporando la interfaz de programación necesaria para consultar los consumos por parte del sistema de gestión central.

Como principales contribuciones del proyecto, se presenta una metodología de análisis y planificación que incluye algoritmos inteligentes para abordar casos realistas del problema con alta eficacia y buen desempeño computacional. Por otro lado, se presenta el diseño e implementación de un prototipo de controlador de hogares para la gestión inteligente de dispositivos eléctricos. Este dispositivo podrá utilizarse a diversos niveles (usuario individual, empresa de control energético, etc.) e integrarse a herramientas de gestión de la red eléctrica en el futuro.

El documento se organiza del modo que se describe a continuación. En el capítulo 2 se presenta el problema abordado en el marco del proyecto, el cual consiste en el prototipado de una solución completa y funcional al problema de gestión de la demanda y administración de energía eléctrica en un grupo de hogares. Se presenta el marco teórico y los desafíos técnicos a solucionar para el prototipado de la solución planteada. A continuación, en el capítulo 3 se presentan los principales trabajos relacionados con este proyecto. En el capítulo 4 se presenta el desarrollo del controlador de hogares y la integración de las componentes electrónicas necesarias para su funcionamiento. Asimismo, se describen los protocolos utilizados para la integración de las componentes electrónicas involucradas en el armado del controlador. En el capítulo 5 se presenta el desarrollo del sistema de gestión de la demanda encargado de la persistencia y procesamiento de los datos. Por otro lado, se presenta la integración necesaria con Khimo para el control y monitoreo de los dispositivos eléctricos hogareños a través de dicho servicio. En el capítulo 6 se presenta el problema a resolver para la definición de la agenda de acciones sobre las cargas, la implementación de algoritmos utilizados en EFEN y los resultados para dos casos de estudio. El primer caso involucra un escenario donde se analiza la disminución del consumo de un termotanque a partir de su gestión inteligente. El segundo caso se corresponde con un escenario hogareño constituido por tres cargas de diferentes prioridades de usos y un contrato de potencia que no permite el uso simultáneo de las cargas definidas. Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones del proyecto y las principales líneas de trabajo futuro.



---

## EL PROBLEMA DE LA GESTIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

Este capítulo presenta el problema abordado en el marco del proyecto, que consiste en el prototipado de una solución completa y funcional al problema de gestión de la demanda y administración de energía eléctrica en un grupo de hogares. En la sección 2.1 se presenta la motivación para resolver el problema de gestión de la demanda de energía eléctrica. En la sección 2.2 se presenta el marco teórico en el cual se basa este proyecto y los tipos de dispositivos eléctricos hogareños (de ahora en más cargas) monitoreados y controlados. En la sección 2.3 se presentan los desafíos técnicos a resolver para el prototipado de un sistema de gestión y control de aparatos eléctricos hogareños. En la sección 2.4 se presenta una introducción al problema de desarrollar un controlador de hogares con capacidad de medir el consumo de las cargas controladas y una breve descripción de las distintas alternativas experimentadas para su desarrollo.

### 2.1 MOTIVACIÓN

El aumento en el consumo de energía eléctrica y el deterioro del medio ambiente son algunos de los desencadenantes de la búsqueda de técnicas alternativas para la generación de energía eléctrica. Esta búsqueda de nuevas fuentes energéticas ha llevado al uso de energías renovables alternativas, como son la energía eólica y la solar, dando lugar a una disminución tanto en costos como en impacto medioambiental consecuente a su producción [21].

Actualmente existe una tendencia creciente en el número de usuarios, que no sólo producen parte de la energía eléctrica que consumen, sino que también han incorporado nuevos tipos de cargas, generando un cambio importante en el patrón de consumo de los hogares. Este cambio en los perfiles de consumo de los hogares provoca la necesidad de adaptar las redes eléctricas de baja potencia para soportar dichos niveles y patrones de consumo [13].

El almacenamiento y administración de la energía eléctrica permite nivelar el consumo a lo largo del día. Las estrategias se basan en conservar energía generada en horas de poca demanda, para luego ser utilizada en horas pico. La utilización de energía conservada en horas de poca demanda permite evitar el uso, por ejemplo, de generadores a combustión para satisfacer la demanda que no pueda contemplarse mediante el aprovechamiento de las energías renovables disponibles.

Si bien existen infraestructuras específicas destinadas a conservar energía para luego ser volcada a la red eléctrica, es posible utilizar cargas domésticas para dicho fin. Esta posibilidad de administrar la energía almacenada en los hogares y poder recurrir a la

misma cuando sea necesario favorece la nivelación de la demanda energética a lo largo del día [18].

Por otro lado, la imprecisión del pronóstico del tiempo genera incertidumbre en la capacidad de producción de energía eléctrica a un corto plazo, lo cual obliga a contar con mecanismos de gestión y control sobre el consumo energético de una región. Dado que no es posible almacenar energía eléctrica alterna en su estado natural y no suele ser rentable su transformación para ser conservada como otro tipo de energía, es conveniente contar con mecanismos que permitan nivelar la cantidad de energía producida con la cantidad consumida por parte de los usuarios.

Para poder adaptar el flujo de energía eléctrica en la red, en respuesta a los cambios repentinos en la capacidad de producción, es necesario poder controlar la demanda de los usuarios por parte del sistema de gestión asociado al proveedor de energía eléctrica. Este control debe tener en cuenta tanto la capacidad de producción de energía eléctrica como el grado de control aceptado por los usuarios sobre sus cargas.

El concepto de gestión de la demanda (en inglés demand-response [17]) nace de la necesidad de cambiar el paradigma de administración del flujo de la energía eléctrica a nivel ciudad, dejando de condicionar la producción de dicha energía en base a la demanda, para condicionar la demanda en base a la capacidad de producción.

La incorporación de energía eléctrica proveniente de energía eólica o solar incorpora incertidumbre en la predicción de la capacidad de producción de energía eléctrica [14]. Este cambio en la oferta de energía eléctrica impacta directamente sobre el costo del kWh para los clientes. La adaptación del consumo de energía eléctrica en base a la capacidad de producción puede derivar en un beneficio económico para los clientes en caso de poder desplazar el consumo hacia horarios más convenientes.

Dado que la cantidad de energía eólica y solar están fuertemente ligadas al momento del día (por ejemplo las horas de luz solar), es posible identificar las horas en que se espera mayor capacidad de producción de energía eléctrica. En la Figura 1 se puede apreciar una posible redistribución del consumo de energía eléctrica de un conjunto de hogares, elevando los valles y disminuyendo los picos de consumo para un período de 24hs. La redistribución del consumo en el día permite un mayor aprovechamiento de los recursos naturales, desplazando los consumos a los momentos del día en los que se pronostica un clima favorable para la producción de energía eléctrica.

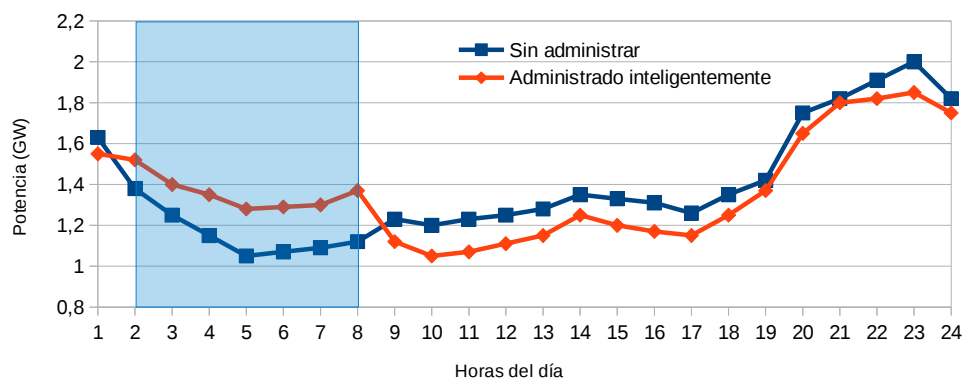


Figura 1: Redistribución del consumo en una región para disminuir picos de consumo de energía eléctrica.

Por otro lado, la gestión de la demanda permite a los proveedores de energía eléctrica obtener una visión completa de la carga de la red, así como controlar el consumo en relación a la capacidad de producción de energía.

Para controlar los consumos es necesario conocer la potencia instantánea demandada por las cargas en todo momento, siendo esta potencia el valor utilizado en la facturación al cliente. Dado que el contrato de energía eléctrica establece un máximo de consumo de potencia instantánea, es necesario contar con mecanismos que eviten la proximidad a dicho máximo. En la actualidad, en caso de que un hogar consuma más energía eléctrica de lo establecido en el contrato se genera un corte del suministro, implicando la disconformidad de los usuarios. Asimismo, la posibilidad de generar un corte en el servicio eléctrico del hogar implica un cambio repentino sobre el flujo de corriente en la red eléctrica, impactando negativamente en la calidad y estabilidad de la red.

Brindar al proveedor de servicio la posibilidad de controlar en tiempo real los flujos de energía permite mejorar la robustez y adaptabilidad de la red eléctrica, favoreciendo el crecimiento de la red de forma segura y económica [22].

## 2.2 CLASIFICACIÓN DE ARTEFACTOS HOGAREÑOS

Dado que el objetivo de este proyecto involucra la gestión del consumo de una región, resulta necesario diseñar mecanismos para el control de las cargas.

Para lograr la gestión de los distintos tipos de cargas hace falta una clasificación que permita su distinción y categorización en función de sus propósitos y sus perfiles de funcionamiento. El propósito de las cargas define el resultado que el usuario espera a partir de su uso; por ejemplo, un televisor cumple una función recreativa con alto grado de interacción con el usuario, un termotanque cumple la función de brindar agua caliente en todo momento sin una interacción directa con el usuario. El perfil de funcionamiento permite establecer las acciones que se pueden realizar sobre las cargas sin afectar el resultado esperado.

A continuación se describe una posible clasificación de las cargas hogareñas considerando sus perfiles de funcionamiento y sus finalidades [23]. Las categorías no son disjuntas, ya que los perfiles de funcionamiento de algunas cargas contemplan más de una categoría.

Las cargas hogareñas pueden clasificarse en:

**INTERRUMPIBLES:** Las cargas interrumpibles son aquellas a las cuales es posible interrumpir el abastecimiento de energía eléctrica en cualquier momento. Este tipo de carga inicia/retoma su actividad al momento de volver a conectarlos a la red eléctrica. En general, las cargas interrumpibles poseen la característica de conservar energía, en su mayoría en forma de calor. Esto es un factor esencial a tener en cuenta a la hora de modificar el comportamiento natural de la carga sin afectar la experiencia de uso. Los principales tipos de cargas que componen esta categoría son: termotanques eléctricos, sistemas de calefacción, acondicionadores de aire y sistemas de refrigeración.

**DESPLAZABLES:** Las cargas desplazables son aquellas que no permiten ser interrumpidas una vez que han comenzado su funcionamiento sin impactar muy negativamente en el servicio. Por otro lado, dada la naturaleza de sus servicios, permiten adelantar o retrasar su inicio sin dejar de satisfacer las necesidades del usuario. Dentro de esta categoría se encuentran cargas como lavarropas, secarropas, etc. Una característica de las cargas desplazables es que generalmente el usuario pretende disponer del resultado de su utilización en determinado momento del día, siendo poco relevante el momento en que la carga es efectivamente puesta en funcionamiento.

**REPARAMETRIZABLES:** Las cargas reparametrizables son aquellas que cuentan con protocolos de comunicación, en general conectadas a una red de área local (Local Area Network, LAN) doméstica. Las cargas reparametrizables permiten la modificación de su comportamiento mediante el uso de protocolos de comunicación. A modo de ejemplo, en el caso de un acondicionador de aire, se podría modificar la temperatura objetivo logrando la disminución de su consumo de electricidad. Las principales cargas que constituyen esta categoría son los acondicionadores de aire, termotanques, sistemas de refrigeración, etc.

**NO CONTROLABLE:** Las cargas no controlables son aquellas que poseen un alto grado de interacción con los usuarios en el momento de su funcionamiento. Esta interacción implica que la manipulación automática de cargas no controlables provoque disconformidad por parte del usuario, ya que se espera un funcionamiento inmodificado de la carga. Dentro de esta categoría se encuentran los sistemas de iluminación, aparatos y dispositivos de entretenimiento, sistemas de seguridad, etc.

En la tabla 1 se presenta un resumen de las características de cada categoría, junto con el nivel de insatisfacción por parte de los usuarios frente a la manipulación automática de las cargas.

Tipo	Característica	Impacto
Interrumpibles	El ciclo de funcionamiento puede ser interrumpido en cualquier momento.	Medio
Desplazables	Puede modificarse el momento de inicio del ciclo de funcionamiento pero no puede ser interrumpido.	Bajo
Reparametrizables	Permiten modificar su comportamiento sin manipulación directa del suministro de energía eléctrica.	Bajo
No controlable	Destinadas a la interacción con el usuario.	Muy alto

Tabla 1: Relación entre la categoría de las cargas y la disconformidad del usuario frente a su manipulación automática.

Dado los impactos sobre la insatisfacción del usuario que cada categoría presenta, se puede concluir que las cargas candidatas a ser controlados son las interrumpibles, las desplazables y las reparametrizables. A pesar de que las cargas interrumpibles implican un impacto de nivel medio sobre la insatisfacción del usuario, es recomendable

permitir su gestión automática dado que en general poseen un alto grado de consumo de energía eléctrica. La gestión automática de las cargas cuyo consumo es elevado permite generar un beneficio económico significativo para los usuarios.

## 2.3 COMUNICACIÓN Y GESTIÓN DE DATOS

La necesidad de registrar el consumo y permitir el control de las cargas en tiempo real implica generar un gran flujo de datos. Para brindar un servicio de gestión de la demanda robusto y de rápida respuesta, es necesario la optimización del flujo de datos implicado en la comunicación entre los controladores de hogares y el módulo central de gestión [2]. Dado que se pretende monitorear y controlar un grupo numeroso de hogares, el diseño de la solución debe tener en consideración el flujo de datos implicado.

Por otro lado, es necesario contar con un dispositivo económico y de fácil elaboración que permita el control de las cargas. Para disminuir los costos de elaboración del controlador de hogares es necesario llevar a cabo una investigación y un análisis de componentes para su desarrollo, evaluando la satisfacción de las necesidades técnicas, la facilidad en su integración y el costo de las componentes utilizadas.

Dado que el manejo de las cargas de los clientes puede categorizarse como manejo de datos sensibles, es necesario la utilizar protocolos de red que den garantía en cuanto a seguridad en la comunicación.

El propósito de este proyecto es el desarrollo de un sistema de gestión que permita la planificación del comportamiento de las cargas controladas. Esta planificación se lleva a cabo mediante la definición de una agenda de acciones a tomar sobre las cargas definidas en el sistema de gestión (ver sección 5).

Asimismo, el sistema de gestión debe permitir la persistencia y el posterior procesamiento de los datos del consumos de energía eléctrica de los hogares. En particular, el interés de este proyecto también incluye el aprendizaje automático del comportamiento y los perfiles de uso de los distintas cargas mediante el procesamiento de los datos recabados. Para lograr dicho aprendizaje, el sistema de gestión debe brindar mecanismos que permitan el acceso a los datos de consumo de las cargas. Por otro lado, el sistema de gestión debe permitir la definición de acciones a realizar sobre las cargas en base al procesamiento de los datos descriptos previamente.

Para facilitar la definición de acciones, el sistema de gestión debe brindar mecanismos de evaluación de satisfacción del usuario y consumo según los criterios que se deseen tener en cuenta a la hora de definir el comportamiento de las cargas. Para esta evaluación, el sistema debe tener en cuenta el consumo de energía eléctrica, la satisfacción del usuario y los costos en llevar a cabo determinada agenda de acciones.

## 2.4 CONTROL Y MONITOREO DE LAS CARGAS HOGAREÑAS

La administración del consumo energético de los hogares requiere contar con dispositivos que permitan controlar el funcionamiento de las cargas y reportar su estado y su consumo en tiempo real.

El controlador de hogares consiste en un artefacto electrónico que permite el control y monitoreo de cargas de forma rápida y segura. Este controlador puede utilizarse para permitir el control de las cargas por parte de los usuarios. La manipulación del controlador puede realizarse tanto físicamente, como remotamente. Se propone realizar la interacción remota mediante el uso de dispositivos móviles inteligentes o computadores personales. Adicionalmente, puede proveerse de mecanismos que permitan el acceso remoto al controlador a través de Internet.

La gran mayoría de las cargas hogareñas actuales no cuentan con mecanismos para ser controladas de forma digital. La falta de capacidad de planificar acciones directamente sobre las cargas hace necesario que el controlador de hogares intervenga de forma no invasiva, más concretamente, permitiendo o no el pasaje de corriente eléctrica hacia la carga controlada. El mismo criterio aplica para la medición del consumo, por lo que deberá realizarse por fuera de la carga que se esté monitoreando.

Por otro lado, es necesario contar con mecanismos que permitan el reporte del estado de la carga y su consumo en cada momento. Dicha información será almacenada en un sistema de gestión y control para su posterior procesamiento (ver sección 5). Para lograr el acceso remoto al sistema es necesario contar con conexión a Internet como medio de comunicación entre el controlador y el sistema central de gestión.

Dado que es posible que los usuarios finales no necesariamente cuenten con conocimientos técnicos sobre operación del controlador, es necesaria una solución con extrema facilidad en su uso. Asimismo, el controlador debe ser capaz de adaptarse a los distintos escenarios que pueden darse en una red doméstica, haciendo lo posible por permanecer conectado con el sistema central de gestión en todo momento.

---

## TRABAJOS RELACIONADOS

---

En este capítulo se describen los principales trabajos relacionados al problema abordado en este proyecto. La sección 3.1 presenta la revisión de un trabajo que estudia el impacto de la utilización de unidades de micro generación (Micro Generation Units, MGU) en los hogares. La Sección 3.2 presenta un trabajo que aborda la disminución de las tarifas mediante el control de cargas de tipo desplazables. En la sección 3.3 se presenta una posible clasificación de cargas hogareñas en base a un artículo de la literatura relacionada. En la sección 3.4 se presenta una solución al problema de la gestión de la demanda en base a un algoritmo multiobjetivo. Finalmente, la sección 3.5 presenta un breve resumen del análisis de la literatura relacionada al problema abordado en este proyecto.

### 3.1 IMPACTO DE LA UTILIZACIÓN DE UNIDADES DE MICROGENERACIÓN EN HOGARES

En esta sección se reseña un trabajo que estudia los beneficios y desafíos técnicos que implica la incorporación de MGU de forma masiva en hogares y el impacto del almacenamiento de energía en los hogares.

Gomes et al. [7] se centraron en mostrar el impacto de tener varios MGU en el contexto de una red de distribución de baja tensión (Low Voltage Distribution Network, LVDN). En una LVDN es difícil mantener la calidad del suministro de energía eléctrica debido al encendido/apagado continuo de aparatos, particularmente aquellos con gran demanda de energía activa y reactiva. El cambio de estado y el consumo de los aparatos causa fluctuaciones en el voltaje de la red. De igual manera, el uso de MGU compromete la calidad de la red eléctrica a la hora de inyectar energía hacia el resto de la red.

La implementación de la gestión de la demanda ofrece un beneficio económico para los agentes involucrados en la distribución de energía eléctrica, ya que es posible posponer la necesidad de incrementar la capacidad de la red mediante la administración automática de la infraestructura existente. Por otro lado, la gestión de la demanda mejora la confianza y la robustez de la red eléctrica, ya que vuelve más predecible el consumo de los hogares.

El impacto negativo frente al uso de MGU es la exposición de la red eléctrica a alzas o fluctuaciones en el voltaje producto de la energía volcada a la red por parte de los hogares, implicando un deterioro en la calidad del servicio brindado.

Como conclusión, los autores de este trabajo enfatizan en la importancia de evaluar cómo se comportan las redes de baja potencia al momento de incorporar MGU y gestión de la demanda (Demand Side Management, DSM), debido a las fluctuaciones y desbalances en el voltaje que esta tecnología genera.

El trabajo presenta como ejemplo una red eléctrica compuesta por 38 buses, de los cuales 28 están destinados al sector doméstico. Este ejemplo presenta tres costos para el kWh según el momento del día. Con dicho escenario en mente, en el trabajo se proponen tres objetivos principales: i) desplazar los consumos de lavarropas, secadoras de ropa y lavavajillas para las horas de menor costo de la energía eléctrica; ii) disminuir la temperatura objetivo en termotanques en las horas de mayor costo de la energía eléctrica y compensar la temperatura en horas de menor costo; y iii) desplazar el momento de encendido de algunos termotanques para evitar su puesta en funcionamiento en horas de mayor costo de la energía. Además, Gomes et al. analizan tres escenarios posibles para el ejemplo presentado: un escenario de referencia sin incorporar MGU ni DSM, un escenario incorporando 10 MGU y un escenario incorporando 10 MGU y DSM. Para simular la incertidumbre en fluctuaciones y consumos se realizaron 300 ejecuciones del método propuesto, basado en simulaciones Monte Carlo. De los resultados obtenidos respecto al comportamiento de la red en los escenarios planteados, se concluye que las variaciones en la calidad de la potencia eléctrica producidas por la incorporación MGU y DSM en redes de baja tensión son notorias, pero se mantienen dentro de los umbrales aceptados.

### 3.2 REDUCCIÓN DE TARIFAS MEDIANTE EL CONTROL DE CARGAS DESPLAZABLES

En esta sección se presenta un trabajo que estudia los beneficios económicos y técnicos del uso de gestión de la demanda.

El trabajo de Soares et al. [24] tiene como propósito definir un modelo y un algoritmo que permita disminuir las tarifas de los clientes considerando el nivel de control otorgado por los usuarios, el precio de la electricidad y el límite de potencia habilitada. El trabajo se centra en cargas de tipo desplazables, es decir, los electrodomésticos cuya ejecución es postergable o adelantable según sea necesario. La planificación automática del comportamiento de las cargas se calcula para las 36 horas siguientes al instante actual, suponiendo que se dispone de información completa en el precio de la electricidad para dicho rango de tiempo. El problema de gestión de carga eléctrica se modela como un problema de programación entera no lineal y la metodología utilizada para minimizar tanto las tarifas como la violación de la curva de limitación de carga es un algoritmo evolutivo personalizado con búsqueda local.

En un algoritmo evolutivo, la creación de nuevas generaciones se realiza mediante la selección, el cruce y la mutación de la generación actual. En cada generación la población se evalúa para calcular la aptitud de cada miembro y se selecciona un grupo de individuos en función de su rendimiento. El proceso se repite hasta que un criterio de convergencia está satisfecho.

En el trabajo de Soares et al. [24] la solución se codifica como un vector de números enteros, donde cada posición indica el minuto en que cada carga comienza su ciclo de funcionamiento. La operación de cruce es realizada mediante la combinación de

dos padres utilizando máscaras aleatorias, intercambiando el momento de inicio de uno o más ciclos de funcionamiento entre cargas diferentes. La mutación es realizada mediante variación acotada del momento de inicio de la puesta en funcionamiento de las cargas.

La función objetivo planteada busca minimizar el costo de la energía consumida, sumado a los costos monetarios asociados a la insatisfacción del usuario, la cercanía del consumo de potencia respecto a la potencia contratada y a la energía disponible en cada intervalo de tiempo. La solución converge antes de alcanzar cien generaciones para treinta casos de prueba, logrando disminuir hasta un 40 % las tarifas del usuario respecto a un caso de referencia. El caso de referencia refleja el costo producto de utilizar las cargas en los momentos del día preferidos por el usuario, controlando solamente que el consumo de potencia no supera la potencia contratada.

Como trabajo futuro, Soares et al. plantean la incorporación de otros tipos de recursos a controlar. Dentro de los nuevos parámetros a controlar se encuentran el nivel de temperatura de los electrodomésticos térmicos, la interrupción de ejecución por períodos cortos de tiempo en ciertos aparatos, y controlar dispositivos de microgeneración y almacenamiento local de energía.

Si bien en el trabajo de Soares et al. se abarcan solamente cargas de tipo desplazables, el enfoque propuesto es de mucha utilidad para este proyecto de grado ya que se propone controlar este tipo de recursos de forma similar a la descrita en el documento estudiado. Asimismo, el enfoque propuesto por Soares et al. para el análisis de la insatisfacción del usuario respecto al control automático de las cargas es de suma utilidad, ya que es necesario considerar dicha insatisfacción para gestionar la demanda de energía eléctrica.

### 3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS DISTINTOS TIPO DE CARGAS HOGAREÑAS

Soares et al. [23] mencionan el concepto de gestión de la demanda (en inglés, demand response) como punto clave para lograr un manejo más eficiente e integrado de los recursos, posibilitando la disminución de tarifas. Desde el punto de vista del sistema de potencia, implementar la gestión de la demanda trae mejoras en la administración de la red, mitigando la variabilidad asociada al uso de energías renovables y reduciendo el impacto inherente a cierto tipo de carga (por ejemplo autos eléctricos) y posibilitando evitar picos de consumo. El trabajo de Soares et al. se centra en el estudio de cuatro categorías de artefactos que no son disjuntas entre sí:

- No-controlables: son las cargas que de ser controlados causan disconformidad (luces, entretenimiento).
- Re-parametrizables: son las cargas que son termostáticamente controlables, permitiendo variar los valores del termostato para controlar el consumo sin causar disconformidad del usuario (heladera, freezer, acondicionador de aire, calefón).
- Interrumpibles: son las cargas que se pueden interrumpir por períodos cortos de tiempo (termotanque, acondicionador de aire, heladera, freezer).

- Postergables/Re-agendables: son las cargas que, por las características de su funcionamiento, puede postergarse/anticiparse su uso de acuerdo a las preferencias del usuario, sin provocar disconformidad (lavaplatos, secador de ropa, lavarropas, termotanque).

El análisis presentado por Soares et al. provee los fundamentos de las diferentes estrategias de administración propuestas para cada tipo de carga. Se evalúa el impacto de utilizar distintas acciones de respuesta automática a la demanda (Automatic Demand Response, ADR) sobre las cargas a analizar. Este impacto se corresponde con las decisiones que toma el proveedor del servicio, ya que debe controlar los dispositivos hogareños para administrar los flujos de la red. En la Figura 2 se muestra, como una elipse, los tipos de acciones que pueden aplicarse sobre cada tipo de carga, indicando la relación entre el consumo anual de cada tipo de carga (ancho de la elipse) y el tipo de control que puede aplicarse (líneas punteadas).

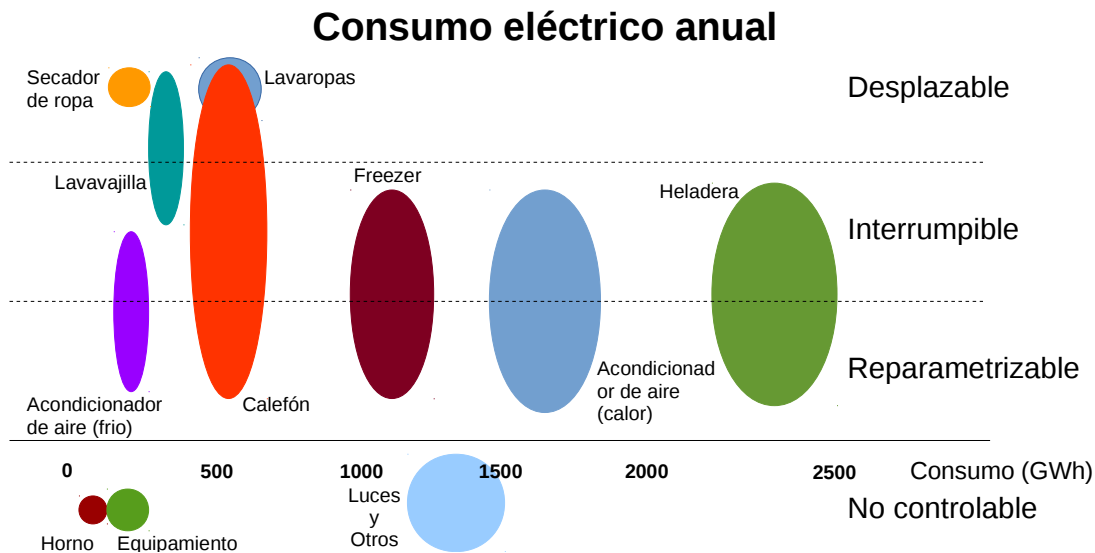


Figura 2: Clasificación de las cargas hogareñas respecto al consumo de energía eléctrica y su comportamiento (en base al gráfico presentado en [23]).

Con el fin de evaluar el impacto del uso del sistema de gestión de consumo de energía (Energy Management System, EMS) para gestionar óptimamente los recursos energéticos disponibles, en el trabajo de Soares et al. [23] se desarrolló un modelo incorporando varios parámetros, incluyendo el precio del kWh, la tasa de propiedad de aparatos, etc., analizando diferentes escenarios y contrastando sus resultados dados los parámetros tenidos en cuenta. Para definir un tope en el consumo diario de los usuarios, se propone el uso de una cota superior de consumo por instante de tiempo que es controlada automáticamente entre los aparatos de la red doméstica.

Por otro lado, se plantean preocupaciones frente a las repercusiones que puede tener una mala administración de la red, como por ejemplo una sobreexigencia de forma repentina, provocando un corte de corriente a nivel regional en caso de superarse la potencia soportable.

En el trabajo de Soares et al. se afirma que la tecnología estudiada puede brindar un incentivo económico a los usuarios finales y a los entes vinculado con el servicio de distribución de energía eléctrica. Además, Soares et al. asegura que esta tecnología permite utilizar más eficientemente la infraestructura existente y evitar o disminuir la construcción de generadores de energía eléctrica.

Si bien el trabajo de Soares et al. y este proyecto de grado poseen un alto grado de similitud en cuanto al problema a resolver, las soluciones planteadas poseen enfoques levemente diferentes. La diferencia de enfoques radica en la forma en que se deciden las acciones a tomar sobre las cargas hogareñas, el cual es más holístico y comprensivo en este proyecto de grado, mientras que el enfoque de Soares et al. considera la administración de las cargas de forma local a los hogares exclusivamente.

En el artículo relevado se presentan numerosos aspectos a tener en cuenta para la realización del proyecto, como ser la clasificación de cargas, la cual abarca la totalidad de cargas que hoy en día constituyen un hogar, así como también el planteo de posibles parámetros o preferencias del usuario a tener en cuenta por parte del sistema para lograr los objetivos.

### 3.4 SOLUCIÓN MULTIOBJETIVO AL PROBLEMA DE LA GESTIÓN DE LA DEMANDA

En el trabajo de Soares et al. [16] se plantea que debido a la falta de conocimiento por parte del usuario respecto a los parámetros involucrados en la administración de la gestión de la demanda, es necesario introducir algún tipo de herramienta para mejorar el uso de la red y dar garantías de seguridad y calidad de servicio frente a la incorporación de energías renovables y microgeneración. El propósito del trabajo presentado por Soares et al. es dar una solución a dicho problema, modelándolo como un problema multiobjetivo. El objetivo de la solución planteada es minimizar las tarifas y la insatisfacción de los usuarios. El grado de insatisfacción difiere entre las cargas e incluso puede variar a lo largo del día para una misma carga.

En trabajo estudiado se consideran penalizaciones graduales respecto al riesgo de interrumpir el suministro de energía eléctrica y respecto a la insatisfacción del usuario. Además, se considera un compromiso variable entre los objetivos a optimizar.

Disminuir la insatisfacción del usuario y a la vez disminuir las tarifas presenta un problema con objetivos contrapuestos. Por este motivo, la solución planteada por Soares et al. se basa en algoritmos genéticos multiobjetivo mediante los cuales se obtiene un conjunto de soluciones no dominantes. Dada la naturaleza del problema, ningún objetivo particular puede ser mejorado sin comprometer el resultado del resto de los objetivos. Para elegir entre las soluciones no dominantes, es necesario definir preferencias que ayuden a evaluar el grado de compromiso entre los diferentes objetivos. Por ejemplo, para ciertos momentos del año el objetivo de disminuir las tarifas puede tener mayor prioridad que el objetivo de disminuir la insatisfacción del usuario. La idea principal es asignar penalizaciones a los comportamientos de los consumos. Por ejemplo, se penaliza la cercanía en el consumo respecto a la potencia contratada. Estas penalizaciones son combinadas en las funciones objetivo para lograr, por ejemplo, la disminución de la insatisfacción del usuario.

Los resultados obtenidos por Soares et al. muestran una disminución en las tarifas entre un 22 % y un 24 % dependiendo de si se busca minimizar los costos, la insatisfacción del usuario o ambos.

Como una mejora a implementar en el futuro se propone la incorporación de pronósticos de generación energética basados en estadísticas y el estado del clima. Este enfoque mejoraría significativamente el resultado en un escenario real, dada la incertidumbre sobre la capacidad de generación de energía eléctrica a mediano y largo plazo.

Los parámetros y criterios presentados por Soares et al. son de utilidad para el desarrollo de este proyecto de grado, dada la similaridad en los objetivos planteados. Por otro lado, el análisis del impacto de las distintas asignaciones de prioridad sobre los objetivos a minimizar muestra los posibles escenarios a seguir a la hora de concretar una solución. Como ejemplo, mantener la conformidad del usuario se plantea como una restricción para este proyecto.

### 3.5 RESUMEN

La Tabla 2 presenta un resumen de los trabajos relacionados, siguiendo el orden en que fueron mencionados anteriormente. Se indica el autor, el año y una breve descripción con la principal contribución del trabajo en el contexto del proyecto de grado.

El relevamiento de trabajos relacionados permite tener un análisis de los objetivos y dificultades que conlleva el desarrollo de un sistema de gestión de la demanda. Por un lado se analizan formas de clasificación de cargas agrupando según la forma en que trabajan y la finalidad para/con el usuario final. Además, se abordan los problemas inherentes a la incorporación de MGU de forma masiva.

Por otro lado, se detallan algoritmos para la definición de las acciones a tomar sobre las cargas. Las restricciones y penalizaciones consideradas en los trabajos relacionados sirven de referencia para el desarrollo de una solución a la gestión de la demanda en el contexto de este proyecto de grado. Dentro de las restricciones más relevantes se encuentran mantener una baja insatisfacción del usuario y mantener un bajo acercamiento del nivel de potencia consumida respecto a un máximo establecido.

El análisis de la literatura relacionada permite concluir que existe lugar para contribuir en soluciones enfocadas en el diseño y en el desarrollo de una infraestructura que permita implementar la gestión de la demanda de energía eléctrica. Dicha infraestructura está compuesta por un sistema de gestión y por controladores de hardware para la eficiencia energética en hogares. El sistema de gestión debe permitir la incorporación de diversos algoritmos inteligentes para la administración del consumo de las cargas mediante el uso del controlador de hogares. Además, es posible contribuir con el diseño y elaboración de un prototipo de controlador de hogares que permita ser controlado remotamente por el sistema de gestión.

autores	año	comentario
Gomes et al. [7]	2011	Presenta casos de estudio respecto al impacto del uso de MGU en redes de baja tensión. Por otro lado, muestra la necesidad de uso de respuesta a demanda para lograr mantener la calidad de la red energía eléctrica frente a las consecuencias del uso de MGU.
Soares et al. [24]	2013	Tomando como referencia aspectos técnicos y preferencias del usuario, plantea el uso de algoritmos genéticos para la administración de cargas del hogar para un período de 36hs, minimizando los costos y la insatisfacción del usuario final.
Soares et al. [23]	2013	Presenta una categorización de cargas basado en disponibilidad, patrones de uso tipo, ciclos de uso y restricciones técnicas necesarias para su correcta automatización. Se analiza el impacto en el consumo energético y se muestran mecanismos de evaluación sobre el desempeño de la red.
Soares et al. [16]	2014	Estudia el uso de un algoritmo para resolver el problema multiobjetivo, optimizando la actividad de las cargas en un período de 36hs. Se utiliza perfiles de preferencia frente a la automatización de cargas y márgenes de seguridad para garantizar calidad en el servicio, mostrando resultados ilustrativos y las características de las diferentes soluciones.

Tabla 2: Resumen de los trabajos relacionados revelados en el marco del proyecto.



---

## DESARROLLO DEL CONTROLADOR DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN HOGARES

---

En este capítulo se describe el desarrollo del controlador de eficiencia energética en hogares y la integración de las componentes electrónicas necesarias. En la sección 4.1 se presenta el diseño y el hardware utilizado, junto con la evaluación de los distintos candidatos de medidores de consumo a utilizar. En la sección 4.2 se describen las conexiones físicas necesarias entre los componentes del controlador y sus protocolos. Posteriormente en la sección 4.3 se describe el protocolo de comunicación del módulo de medición stpm01/10 y de la PDU Cyberpower. A continuación, en la sección 4.4 se describe el prototipo de controlador de hogares en su formato final. En la sección 4.5 se presentan alternativas de diseño e implementación para el controlador de hogares. Finalmente, en la sección 4.6 se presenta la configuración y software de administración para el correcto funcionamiento del controlador.

### 4.1 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DEL HARDWARE DEL CONTROLADOR DE HOGARES

Para el desarrollo del controlador se optó por utilizar un módulo destinado a la medición del consumo de energía eléctrica, un relé destinado al control directo del pasaje de corriente eléctrica y un ordenador de placa única (Single Board Computer, SBC) encargado de mantener una conexión a través de Internet con el sistema central y controlar tanto el relé como el módulo de medición de consumo.

Dado que uno de los objetivos en la elaboración del controlador es mantener un bajo costo, se optó por utilizar componentes económicas que den garantía en su funcionamiento. Para el módulo central del controlador se utilizó la placa RPi [19] como SBC dado su bajo costo, su vasta documentación y su capacidad de ejecutar un sistema operativo basado en Debian (Linux). Utilizar una SBC basada en Linux facilita la portabilidad de la solución, la extensión de las funcionalidades del controlador mediante la incorporación de nuevos softwares y el desarrollo del controlador dado que se cuenta con herramientas brindadas por el sistema operativo. Por otro lado, dado que existen numerosos proyectos desarrollados con la RPi en los cuales se implementaron funcionalidades similares a las requeridas en este proyecto, se asume un correcto funcionamiento de la SBC para el desarrollo del controlador de hogares.

La placa RPi cuenta con un puerto Ethernet que permite la conexión a una LAN doméstica, así como también puertos USB para facilitar la conexión a una red WiFi mediante el uso de una tarjeta de red WiFi-USB. Por otro lado, la RPi cuenta con un controlador de interfaz periférica serial (Serial Peripheral Interface, SPI) con capacidad

de conectar hasta dos componentes externos y numerosas entrada salida de propósito general (General Purpose Input Output, GPIO) útiles para el control de relés.

Dentro de las funcionalidades esperadas para el controlador se encuentran el control del pasaje de corriente eléctrica hacia la carga controlada y la medición en tiempo real del consumo de corriente eléctrica de la carga. Dado que la RPi no cuenta con las componentes necesarias para medir consumo y controlar corriente alterna, resulta necesario incorporar hardware externo que permita ser controlado por la RPi, para implementar así la funcionalidad esperada.

Para la definición del módulo encargado de la medición del consumo de energía eléctrica se evaluaron numerosas alternativas entre las cuales se destacan las siguientes tres:

- STPM01/10: Microchip desarrollado por STMicroelectronics, el cual permite la medición de potencia instantánea mediante protocolo SPI adaptado [12].
- MCP3905A: Microchip desarrollado por Microchip Technology el cual ofrece su medición mediante un pulso digital de frecuencia proporcional a la medición [9].
- CS5463: Microchip desarrollado por Cirrus Logic, el cual ofrece la medición de potencia instantánea mediante un protocolo serial [8].

Si bien todas las opciones evaluadas ofrecen los datos necesarios para la construcción del controlador, se optó por utilizar el microchip STPM01 dado que implementa una modificación del protocolo serial SPI, permitiendo su integración con la RPi. Las modificaciones del protocolo SPI necesarias para integrar el microchip con la RPi se implementaron mediante el reemplazo de ciertos puertos del protocolo SPI original por el uso de GPIO controlados por software.

La calidad de la documentación de las componentes es de remarcada importancia, ya que influye directamente en el tiempo y esfuerzo necesario para la integración del modulo con la RPi. En este aspecto, el STPM01 fue el microchip con mayor claridad y abundancia en la documentación encontrada para cada una de las opciones.

Para lograr controlar el flujo de corriente alterna utilizado por las cargas controladas es necesario el uso de un relé. El relé es un dispositivo electromagnético que permite interrumpir un circuito de corriente eléctrica mediante una señal eléctrica de magnitudes mucho menores a la controlada. Para la integración de la RPi con el relé se optó por utilizar una componente diseñada para ser utilizada con una placa Arduino [1], dado su bajo costo y facilidad de manipulación. El módulo con relé consiste en un circuito que contiene un relé, pins y las componentes electrónicas necesarias para el control del relé mediante una señal digital. Contar con un módulo con un relé controlable por señales digitales disminuyó el tiempo y el esfuerzo necesario para ser integrado con la RPi, ya que dicha SBC sólo cuenta con pins digitales [19].

La posibilidad de conectar la RPi a una LAN permite la integración de dispositivos presentes en la misma red de datos facilitando la extensión en cuanto a funcionalidades del controlador de hogares [19]. Dado que el objetivo del controlador de hogares es el control y monitoreo de las cargas, la integración de nuevo hardware que implemente dicha funcionalidad es de suma utilidad para incrementar el número de cargas que se pueden controlar y monitorear. Un ejemplo de dispositivo que cumple con permitir el control y monitoreo del consumo de las cargas a través de una red de datos es una PDU. La Cyberpower es una PDU diseñada para ser montada en un rack, destinada al control y monitoreo del consumo de hasta ocho tomas de corriente en conjunto [3]. Si bien la Cyberpower posee una interfaz Ethernet que permite su conexión a una LAN, dicha PDU no cuenta con mecanismos que permitan su acceso desde fuera de una red local. Esta imposibilidad de controlar la Cyberpower de forma remota requiere utilizar un dispositivo ubicado en la misma LAN que permita el control y monitoreo de PDU a través de Internet.

#### 4.2 CONEXIONES FÍSICAS ENTRE LAS COMPONENTES DEL CONTROLADOR DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN HOGARES

El controlador debe ser capaz de controlar el consumo de las cargas sin interactuar directamente con las mismas. Para controlar el flujo de energía eléctrica dirigida a las cargas se utilizaron relés controlados a través de la RPi.

En la Figura 3 pueden apreciarse las conexiones entre la RPi y el módulo que contiene el relé, destacando en rojo el cable para transmitir la señal digital que controla el estado del relé (abierto/cerrado), en violeta el cable a tierra y en azul el cable a fuente de 5.0 volts.

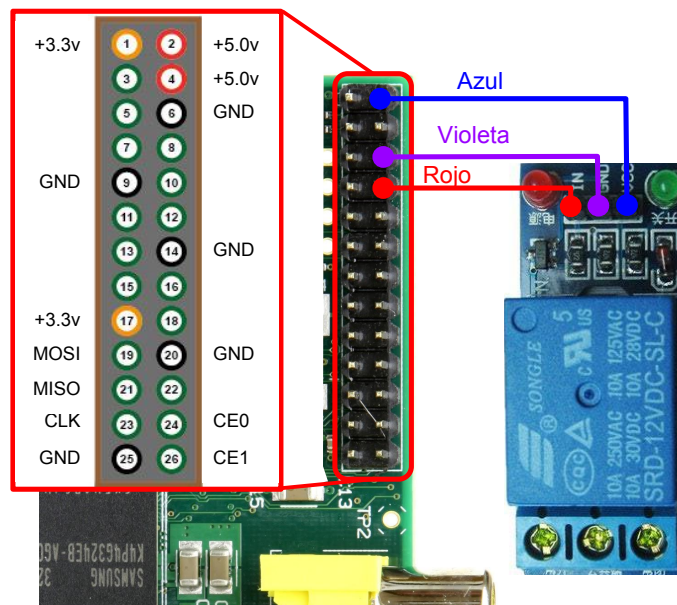


Figura 3: Conexiones entre la placa RaspberryPi y el módulo con relé.

Para lograr la integración del chip stpm01/10, se utilizó la placa de evaluación steval-ipe016v1 [11]. La placa steval-ipe016v1 implementa un circuito que facilita la evaluación y prototipado de circuitos que utilicen el chip stpm01/10, dando la posibilidad de conectar los pins mediante cables y plaquetas de prototipado de circuitos.

Con el fin de flexibilizar la utilización y facilitar la integración, el stpm01/10 ofrece dos formas de medir el flujo de corriente eléctrica. Uno de los modos para medir el flujo de energía eléctrica utiliza una resistencia de desviación. Este modo requiere el pasaje de la corriente por una resistencia muy baja. La otra forma de medir el flujo implementada por stpm01/10 es mediante una bobina que rodea el cable que se desea monitorear. De estos dos métodos, se optó por utilizar el segundo por razones de seguridad de operación y manipulación, ya que permite operar sin tener el cable de corriente alterna (220 volts) al descubierto.

En la Figura 4 se aprecia la plaqueta de evaluación utilizada para el desarrollo del controlador, donde se destaca el recorrido de los cables de corriente alterna, así como también los pins para el canal de datos y el micro stpm01/10. Los cables conectados a "Entrada - AC" y "Salida - AC" transportan la corriente alterna necesaria para alimentar la carga que se esté monitoreando. Con línea punteada se señala la parte de uno de los cables de corriente alterna que pasa por dentro de la bobina de la placa de evaluación utilizada.

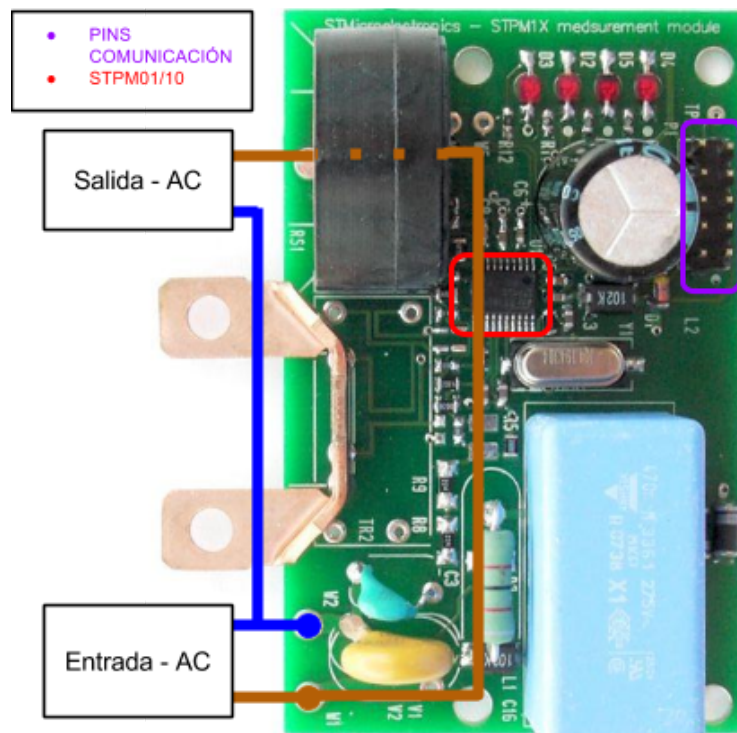


Figura 4: Placa de evaluación stevalipe016v1 para el micro stpm01/10.

El stpm01/10 utiliza una leve modificación del protocolo SPI para la comunicación, mientras que la RPi presenta una implementación estándar del mismo protocolo. Como consecuencia, es necesario adaptar la implementación presente en ambas componentes.

Dada la flexibilidad de control sobre los GPIO de la RPi, se optó por complementar el controlador SPI incluido por la RPi con la utilización de GPIO controlados por software.

El estándar de SPI especifica que es un protocolo del estilo maestro-esclavo de cuatro cables, de los cuales dos son utilizados para la transmisión de datos, logrando así una conexión full-duplex. Dado que es posible que exista más de un esclavo en el bus, cada uno cuenta con un pin con el nombre de ChipSelect, el cual al ser seleccionado por el maestro (valor lógico cero) activa la comunicación entre dicho esclavo y el maestro.

El stpm01/10 presenta un SPI de tres cables. Esto implica la utilización de un solo cable para datos (conexión duplex), utilizado tanto para leer el consumo como para modificar la configuración del stpm01/10. Dado que la RPi presenta una implementación estándar del protocolo SPI, se utilizó el pin de lectura de datos para leer el stpm01/10. La calibración del consumo se realizó mediante software ejecutando en la RPi de forma externa al stpm01/10.

El stpm01/10 no utiliza el pin de ChipSelect ni el pin de modo de lectura/escritura bajo el estándar SPI. Para controlar el stpm01/10 es necesario reemplazar los pins de ChipSelect y selección de lectura/escritura del SPI de la RPi por el uso de GPIO controlados por software.

En la Figura 5 puede apreciarse la conexión de los pin MOSI (Master Output Slave Input), MISO (Master Input Slave Output) y CLK, controlados por el módulo SPI de la RPi. Los cables MISO y CLK están representados en violeta y gris respectivamente. Por otro lado, se destaca en verde la señal para indicar lectura o escritura del canal (pin 22) y en azul la señal de ChipSelect (pin 18). Los cables de tierra (pin 9) y fuente (pin 17) están representado con los colores púrpura y mostaza respectivamente.

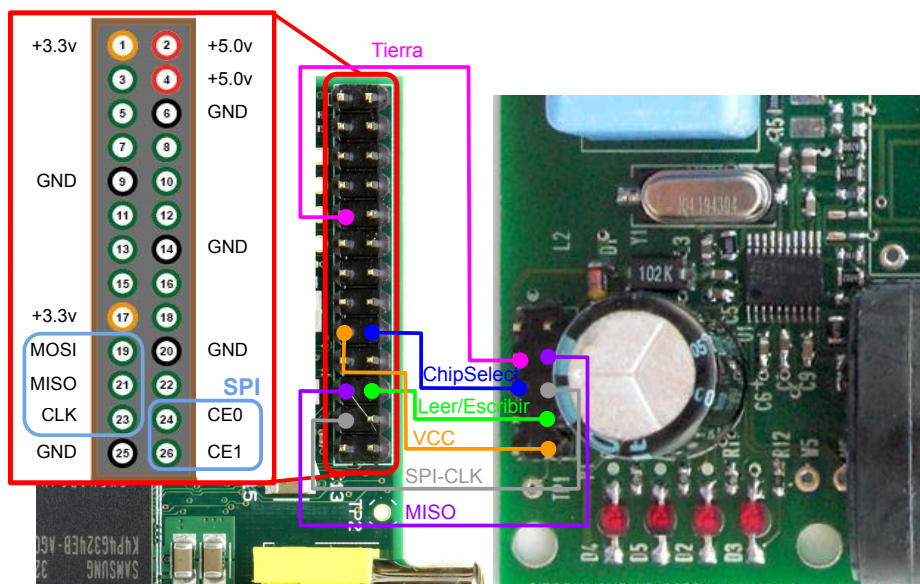


Figura 5: Conexiones para la comunicación entre el RPi y el stpm01/10.

La conexión de la RPi a la Cyberpower se realizó mediante un cable Ethernet. Si bien se puede utilizar un cable Ethernet directamente entre la RPi y la Cyberpower, se optó por utilizar un enrutador con WiFi como intermediario, permitiendo así la conexión de más dispositivos a la misma red local. Contar con la posibilidad de conectar más dispositivos a la misma red local permite el control del controlador mediante dispositivos inteligentes, concretamente teléfonos celulares o tabletas, sin necesidad de contar con conexión a Internet.

El control de los dispositivos hogareños a través de protocolos de red estándares permite la interconexión digital entre los dispositivos tanto de forma local como a través de Internet. Este concepto de exponer a Internet los objetos de uso cotidiano lleva el nombre de Internet de las cosas (Internet Of Things, IoT) y consiste en definir un canal que permita la comunicación y por ende el trabajo colaborativo, de los dispositivos conectados a Internet [10]. Dado que uno de los intereses de este proyecto es permitir el control remoto de las cargas hogareñas, realizar el desarrollo del controlador de hogares en base al concepto IoT permite facilitar la integración con otros dispositivos y ofrecer un control ubicuo sobre las cargas hogareñas controladas.

#### 4.3 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN ENTRE LAS COMPONENTES DEL CONTROLADOR DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN HOGARES

Esta sección presenta los protocolos y conexiones físicas entre las componentes del prototipo de controlador de hogares. La sección 4.3.1 presenta el cableado y el protocolo del módulo stpm01/10. A continuación, en la sección 4.3.2 se presenta la conexión y protocolo de la PDU Cyberpower.

##### 4.3.1 Integración con el medidor stpm01/10

La comunicación con el módulo stpm01/10 se realizó utilizando una modificación del protocolo SPI, reemplazando alguno de los pins de control de dicho protocolo por GPIO controlados por software.

Mediante el uso del canal de comunicación, el stpm01/10 permite su lectura y la configuración de numerosas funcionalidades, muchas de las cuales escapan a las necesidades del desarrollo del prototipo buscado. Una lectura/escritura sobre el stpm01/10 implica la lectura/escritura de los registros internos del stpm01/10 en base al comando y valores enviados a través del controlador SPI.

El medidor stpm01/10 permite leer los valores del consumo sin haber sido calibrado previamente. Si bien la calibración del stpm01/10 favorece la obtención rápida y precisa del valor del consumo, se optó por realizar la calibración mediante software, disminuyendo los tiempos de desarrollo dada la facilidad respecto a implementar la calibración interna del stpm01/10.

La calibración por software fue definida mediante la comparación del valor obtenido utilizando el stpm01/10 y el valor obtenido mediante medidores previamente calibrados. Con el fin de corroborar la correcta calibración del medidor, se comparó el resultado obtenido utilizando el stpm01/10 con los requerimientos de corriente eléctrica de artefactos cuyo consumo es conocido, siendo éste, uno de los mecanismos recomendados por el fabricante.

Para obtener el consumo de potencia medido por el stpm01/10 es necesario realizar la lectura de los registros del medidor mediante la interfaz SPI. Según la especificación del protocolo de comunicación del medidor, la lectura de sus registros puede definirse en dos etapas, denominadas medición y comunicación [12].

Para lograr la correcta lectura de los registros de consumo es necesario poner el medidor en estado de medición. El estado de medición del medidor se logra utilizando los GPIO destinados a ChipSelect y a modo de lectura/escritura del esclavo. Dentro del stpm01/10 la medición consiste en la escritura de los Flip-Flops de la interfaz de datos del SPI del chip con los valores obtenidos en la última medición.

Posteriormente es necesario activar la interfaz SPI para leer los datos a recabar a través de ella, dando lugar a la etapa de comunicación. Luego se debe reiniciar el reloj del canal y activar la interfaz SPI permitiendo así la lectura de hasta 8 registros de 32 bits a razón de un bit por pulso ascendente de reloj.

Si bien el protocolo contempla la utilización de la técnica de paridad para analizar la correctitud de los datos, esta etapa es realizada dos veces consecutivas para garantizar su correcta lectura tomando en cuenta que el canal utilizado es propenso a errores.

La implementación del protocolo fue realizada en una primer etapa en el lenguaje de programación C y posteriormente el código fue portado a python con el propósito de ser integrado con el prototipo de controlador implementado en dicho lenguaje.

La Figura 6 presenta el protocolo para la lectura de los registros del stpm01/10.

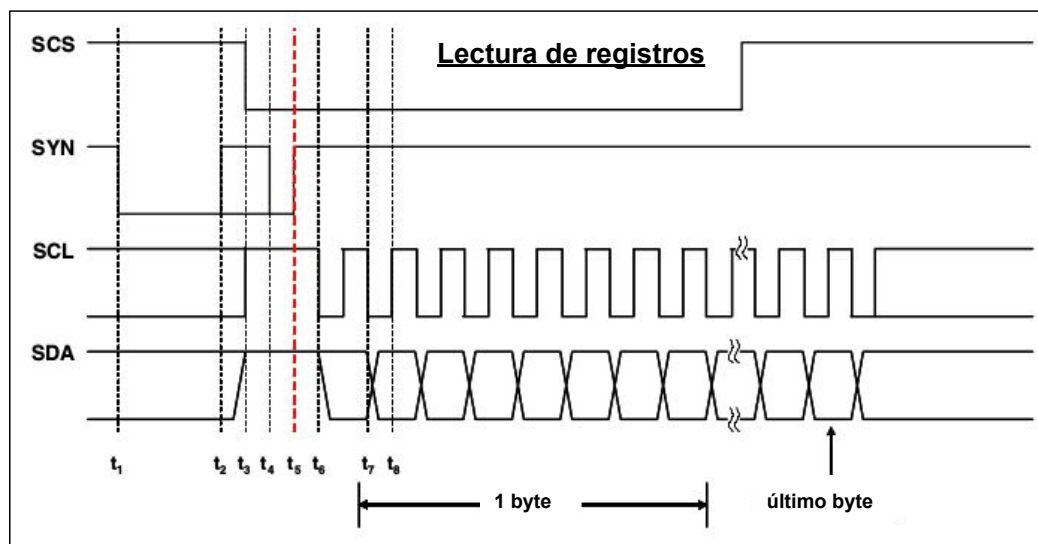


Figura 6: Especificación del protocolo de lectura de los registros del chip stpm01/10.



Con el fin de poder corroborar la correctitud de los datos obtenidos a través del SPI, cada registro cuenta con un bloque de bits de redundancia que permite la detección de error en la transmisión de los datos. En los cuatro bit más significativo (most significant bit) de cada registro puede apreciarse un nibble bajo el nombre de paridad, el cual se corresponde con la paridad impar de los bits en la misma posición de cada nibble del resto del registro.

Dado que el stpm01/10 envía los datos de a byte, y en particular, envía primero el byte menos significativo, es necesario reordenar los bytes recibidos para conseguir la tira de 32 bits de la cual se pueden interpretar correctamente los datos recibidos. En la Figura 8 se ilustra el reordenamiento necesario de los bytes de datos recibidos a través de la interfaz SPI.

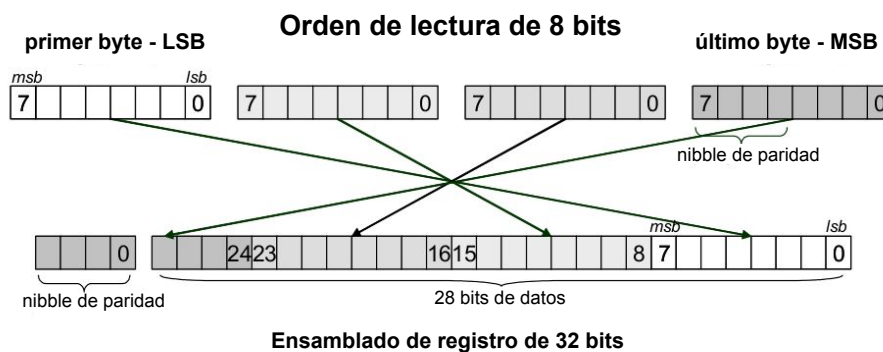


Figura 8: Reordenamiento de los bytes enviados por el stpm01/10.

Si bien el stpm01/10 permite ser configurado para publicar solamente los valores de los registros de interés a través de la interfaz SPI, se optó por evitar dicha configuración y facilitar la integración con la RPi. Por otro lado, la lectura de más registros de los estrictamente necesarios no impidió lograr una velocidad de respuesta satisfactoria, dado lo despreciable de dicha demora frente a los tiempos de transmisión de los datos por Internet.

Los registros de interés del medidor stpm01/10 para calcular la potencia instantánea son media cuadrática del voltaje y media cuadrática de la corriente. Dado que la potencia instantánea equivale al producto de la corriente eléctrica con el voltaje, la potencia consumida por la carga controlada se corresponde con el producto del valor de los registros media cuadrática del voltaje con media cuadrática de la corriente. Cabe aclarar que previo al cálculo es necesaria la calibración por software de los valores obtenidos a través de la interfaz SPI.

#### 4.3.2 Integración con la PDU Cyberpower

Dado que la Cyberpower publica directamente el valor de potencia instantánea, no es necesario realizar cálculos posteriores a la lectura del medidor.

La lectura del consumo medido por la PDU Cyberpower se realiza mediante la consulta intermitente de una página web publicada por la PDU. Dicha página web tiene

como propósito brindar una interfaz de usuario para el control y el monitoreo del estado del dispositivo.

Por otro lado, el control de los relés internos de la PDU fue implementado mediante la automatización de una sesión telnet en un script, indicando la acción a realizar en función del estado de cada relé. El estado de los relés es mantenido de forma local a la RPi, lo cual es necesario al momento distinguir el comando a utilizar para cambiar el estado de los relés de la Cyberpower. Para asegurar la consistencia del estado de los relés sólo se considera correcta la ejecución de un comando si el script encargado de esta tarea finaliza sin error, es decir, un relé se considera cerrado si el comando enviado para cerrarlo ejecuta correctamente.

En cuanto al control de la Cyberpower, se presenta como dificultad la característica de no permitir más de una sesión, tanto telnet como web, abierta al mismo tiempo. Esta característica implica tener que abrir y cerrar cada sesión en el menor tiempo posible para garantizar el correcto funcionamiento de la integración. La Cyberpower cierra automáticamente las sesiones que estén abiertas e inactivas por más de un minuto. Dado que esperar un minuto para volver a acceder a la Cyberpower es inaceptable para el propósito de este proyecto, es mandatorio asegurar la correcta finalización de la sesión utilizada en cada interacción con ella. Para esto, la finalización de una sesión telnet o web con la Cyberpower se realiza simulando las acciones del usuario.

#### 4.4 PROTOTIPO DEL CONTROLADOR DE HOGARES

El controlador de hogares debe cumplir con los requisitos de ser un dispositivo seguro y de fácil manipulación que permita su control de forma remota a través de Internet. Tomando en cuenta estas funcionalidades, se buscó una presentación robusta que facilite el traslado y la utilización del controlador de hogares con diferentes tipos de cargas.

Dada la constante manipulación con corriente eléctrica de alto voltaje, es de suma importancia aislar los cables implicados en el funcionamiento del controlador. Con el fin de hacer segura la manipulación del controlador, sus componentes se mantienen dentro de una caja eléctrica, aislando la electrónica y los cables de alto voltaje. Por otro lado, la caja eléctrica ayuda a mantener la atmósfera y la humedad que llega a las componentes del controlador, siendo de suma importancia a la hora de utilizarse, por ejemplo, para el control de un termotanque dentro de un baño. En la Figura 9 se puede apreciar el diseño del prototipo de controlador de hogares al final del proyecto. El conector de corriente macho de 220 volt no está visible en dicha figura, pero es similar al conector hembra del controlador.

Con el propósito de facilitar la instalación y disminuir el número de componentes a manipular, se agregó una fuente de 5.0 volts dentro de la caja eléctrica del controlador de hogares. El transformador utilizado como fuente para el controlador es alimentado por el mismo cable de corriente alterna que alimenta la carga controlada. El uso del mismo cable para alimentar el transformador no afecta la medición del consumo de la carga, porque el transformador está conectado en paralelo con la línea que sigue hacia la carga. Disponer de la fuente en el interior de la caja eléctrica evita la utilización de

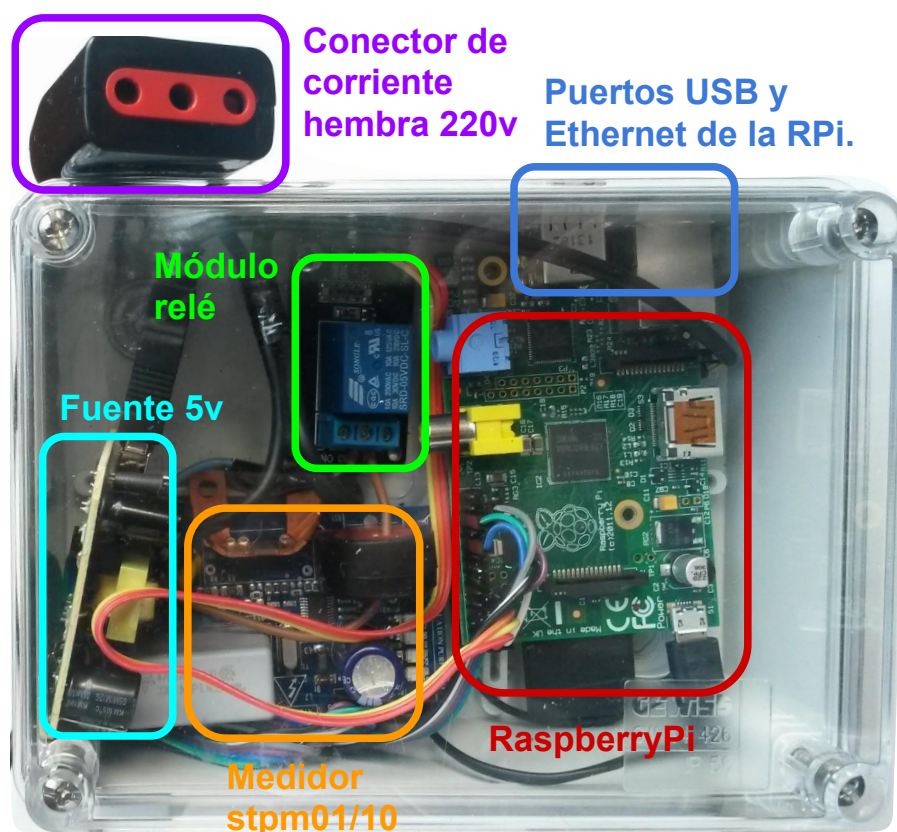


Figura 9: Prototipo de controlador de hogares.

dos tomas de corriente del hogar para el funcionamiento del controlador (una para el transformador y otra para la carga).

El controlador comienza su funcionamiento al momento de ser enchufado a un toma corriente, intentando conectarse automáticamente al sistema central de gestión utilizando el Internet ofrecido por la LAN presente en el hogar.

El prototipo cuenta con un conector macho de 220 volt compatible con un toma corriente hogareño. Por otro lado, el controlador cuenta con un conector hembra de 220 volt destinado a alimentar la carga. Bajo este diseño, el controlador puede verse como un intermediario entre la red eléctrica del hogar y la carga controlada.

Para asegurar el funcionamiento de la carga controlada frente a fallas en el controlador de hogares, por ejemplo ante la pérdida de conexión a Internet, se decidió utilizar el relé de forma de que su comportamiento por defecto sea permitir el pasaje de corriente. Típicamente, los relés poseen dos formas de ser conectados al cable que se desea controlar: una forma permite el pasaje de corriente cuando el relé está abierto (conexión normalmente cerrada) y la otra permite el paso de corriente cuando el relé está cerrado (conexión normalmente abierta). Para favorecer el uso de la carga en caso del mal funcionamiento de la infraestructura, por ejemplo, ante la pérdida de conexión a Internet, se decidió utilizar la conexión del relé normalmente cerrada. Utilizando di-

cha conexión para el relé, el controlador se comporta de forma análoga a un alargue doméstico al momento de iniciar.

Con el fin de facilitar el uso e instalación del controlador, se decidió mantener accesibles los puertos USB y Ethernet de la RPi. Exponer los puertos facilita la conexión del controlador a una red cableada Ethernet o a una red inalámbrica WiFi mediante el uso de un adaptador USB-WiFi. En la Figura 9 puede apreciarse la disposición de los puertos USB y Ethernet en el controlador de hogares.

Por otro lado, y dado que el control remoto del controlador es realizado a través de Internet, es necesario resolver el problema del establecimiento de la conexión con el controlador cuando el mismo se encuentra dentro de una LAN privada. Por lo general, las LAN domésticas implementan traducción de direcciones de red (Network Address Translation, NAT) para brindar acceso a Internet a cada dispositivo conectado a la red local. Este mecanismo imposibilita establecer una conexión con un dispositivo presente en un LAN desde fuera de la misma, por lo que es necesaria la intervención del dispositivo en el proceso de establecimiento de una conexión. Con el fin de facilitar el prototipado del controlador de hogares, se optó por utilizar software e infraestructura brindada por la empresa Ikatu (Gletin S.A.), que resuelve el problema antes descrito del establecimiento de una conexión. Concretamente, Ikatu brinda la plataforma Khimo (sitio web: [www.khimo.com](http://www.khimo.com)) que permite el control y monitoreo en tiempo real y de forma remota de dispositivos destinados a domótica, entre otros.

A su vez, Khimo cuenta con la implementación de un software cliente que permite ejecutar comandos de consola previamente definidos en cualquier computador que ejecute Linux como sistema operativo. Este cliente permitió controlar los comandos definidos en la RPi a través de Khimo, ofreciendo un panel web para la interacción por parte de los usuarios y un canal de comunicación para la administración de forma remota de las RPi. Dado que el cliente de Khimo para Linux no contempla la medición del consumo de corriente eléctrica de las cargas controladas, fue necesario extenderlo para implementar dicha funcionalidad. Concretamente, se desarrollaron programas destinados a ejecutar en forma paralela al cliente de Khimo, los cuales están encargados de la medición del consumo de las cargas controladas. Se definió un programa por módulo de medición que esté siendo controlado por la RPi, concretamente, uno para el módulo stpm01/10 y otro para la PDU. Dado que el cliente de Khimo permite responder a cambios en el sistema de archivos del computador, la comunicación entre dicho software y los programas de medición de consumo se realiza mediante el sistema de archivos de la RPi.

La frecuencia de lectura del consumo de energía eléctrica es de una lectura por segundo, independientemente del medidor utilizado (stpm01/10 o PDU). Para disminuir el flujo de datos en la red solo se reportan los cambios en el consumo, es decir, cuando se lee un valor de consumo diferente al leído en el período inmediato anterior.

## 4.5 ALTERNATIVAS DE DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

En esta sección se describen las alternativas de diseño e implementación que se investigaron para el desarrollo del controlador de hogares. En la sección 4.5.1 se detalla el diseño investigado para el desarrollo del controlador. Finalmente, en la sección 4.5.2 se describe el framework de desarrollo Django y se presenta la justificación de por qué no se utilizó para la implementación del prototipo.

### 4.5.1 *Diseño Del Controlador*

La primera versión del controlador fue diseñada e implementada teniendo en cuenta su extensibilidad, dejando abierta la posibilidad de incorporar nuevos tipos de dispositivos a ser controlados.

Se utilizó un diseño en capas que contempla tener una interfaz para el control del dispositivo por parte del usuario a través de cualquier navegador web. Además, el diseño posee una capa encargada de la lógica propia del controlador y otra capa dedicada a la comunicación entre el controlador y los distintos dispositivos hogareños. La capa destinada a la comunicación con los dispositivos hogareños contempla la conexión de submódulos de hardware con el fin de extender las capacidades de la RPi. Los submódulos pueden ser controlados de forma cableada e inalámbrica (mediante la incorporación de antenas a la RPi). Este diseño independiza el hardware utilizado para el control y monitoreo de los dispositivos hogareños respecto al resto del código del controlador. Durante todo el diseño se tuvo como requisito mantener un bajo acoplamiento entre las capas, dando lugar a una fácil adaptación frente al cambio de funcionalidades.

En la Figura 10 se muestra un diagrama del diseño del software del controlador de hogares, donde se presentan las clases definidas y las capas separadas por líneas punteadas.

A continuación se detallan las capas de software que componen el controlador:

- La capa correspondiente a *COMUNICACIÓN REMOTA* es la encargada de implementar el protocolo utilizado a través de Internet, por ejemplo, el protocolo para conectar la RPi con Khimo.
- La capa *INTERFAZ DE COMUNICACIÓN EXTERIOR* es la encargada de presentar una interfaz de programación de aplicaciones (Application Programming Interface, API) que permite controlar el dispositivo implementando la clase *InterfazDePresentación*. Esta decisión de diseño permite controlar el dispositivo desde distintas fuentes (servidor web, Khimo, etc), homogeneizando la interfaz de interacción con la lógica del controlador.
- La capa *CAPA LÓGICA* especifica los conceptos que definen el comportamiento del controlador. La clase *Dispositivo* define las cargas a controlar: la clase *Valor* representa los parámetros que definen a cada dispositivo. Por ejemplo, si se define un relé como dispositivo, una instancia de la clase *Valor* referiría a su estado



#### 4.5.2 Descripción del framework Django e Implementación del Controlador de Hogares

Django [4] es un Framework para aplicaciones web del estilo altas, bajas y modificaciones, desarrollado en Python [5].

Si bien Django ofrece numerosas funcionalidades que escapan a los requerimientos necesarios para el desarrollo del controlador de hogares, se decidió utilizarlo ya que favorece el rápido desarrollo de un prototipo del sistema. Dentro de las funcionalidades que influyeron la decisión de utilizar Django se encuentran el manejo de usuarios, el control de acceso, la persistencia de los datos, la fácil integración con servidor web, entre otros.

En cuanto al manejo de usuarios, Django permite la autenticación y control de acceso a los recursos definidos. Este control permite la definición de niveles de acceso y de control de los artefactos hogareños para cada usuario.

En lo que respecta a la persistencia de los datos, Django abstrae el manejo de consultas a la base de datos, permitiendo enfocar el desarrollo en la lógica del controlador. Esta capacidad de persistir datos es fundamental para el desarrollo del controlador, ya que la configuración y la definición de las cargas controladas deben recordarse entre ejecuciones aisladas.

Asimismo, Django provee de un servidor web "liviano" que permite el rápido desarrollo de una página web para el uso del controlador. Además, Django posee una interfaz web para la administración de los datos alojados en la base de datos, que es útil para depurar, modificar o añadir datos de forma manual.

Dado que el controlador debe realizar las mediciones de consumo de forma independiente a la interacción con el usuario, es necesario complementar Django con otras componentes de software debido a que está desarrollado para interactuar a través de un servidor web. Las componentes adicionales se utilizan para medir el consumo de las cargas controladas mediante una consulta intermitente (polling) al dispositivo de medición de consumo de corriente eléctrica, y la persistencia del consumo y del estado de las cargas es realizado sobre la base de datos.

Asimismo, dado que el framework Django requiere que se programe utilizando explícitamente cada clase, no es posible respetar el diseño del controlador tal cual como fue presentado en la sección 4.5.1, porque no permite el manejo de un conjunto de instancias de clases distintas que heredan de una misma clase. Esta limitante impidió respetar el diseño de clases presentado en la Figura 10 en su totalidad, ya que el mismo declara el uso de herencia entre clases.

Por otro lado, dada la baja capacidad de cómputo de la RPi no es posible la ejecución del código desarrollado en Django con la velocidad requerida para su correcto funcionamiento. Esta restricción de velocidad en la ejecución provocó que se descartara la utilización de Django para el desarrollo del prototipo de controlador de hogares.

#### 4.6 SOFTWARE PARA LA ADMINISTRACIÓN DEL CONTROLADOR

Dado que para configurar el software del controlador de hogares en la RPi es necesaria la ejecución de numerosos comandos en una terminal del sistema operativo, se optó por definir scripts conteniendo dichos comandos. La agrupación de coman-

dos en scripts facilita la puesta en funcionamiento del controlador de hogares, ya que automatiza la serie de instrucciones necesarias para su configuración.

Algunos de los scripts implementan la configuración de una RPi, copiando los archivos implicados en las direcciones del sistema de archivos que corresponda, instalando los paquetes que se requieran y definiendo el software a iniciar automáticamente en la RPi. La ejecución automática del software del controlador se lleva a cabo mediante el uso de servicios ofrecidos por Linux.

Asimismo, mediante la ejecución de los scripts se define un nuevo usuario con permisos de administrador. El desarrollo y mantenimiento del controlador se realiza mediante una consola de comandos segura (Secure Shell, SSH) utilizando el usuario previamente creado. Asimismo, los scripts de configuración definen y clonan el repositorio Git [6] utilizado para el desarrollo y mantenimiento del software del controlador. La utilización de un repositorio Git permite la rápida actualización del código fuente y de los documentos implicados en el funcionamiento y mantenimiento del controlador.

Dado que el servidor de desarrollo de Khimo es ejecutado en una LAN virtual dentro de un computador personal, donde la red virtual no es visible para el resto de la LAN, se definió un script que actualiza las tablas de enrutamiento de la RPi con el fin de permitir la conexión del controlador de hogares con el servidor de desarrollo.

---

## DESARROLLO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE LA DEMANDA E INTEGRACIÓN CON KHIMO

---

En este capítulo se presenta la arquitectura de la solución del sistema de gestión de la demanda y las componentes involucradas para la comunicación del controlador con el módulo central. En la sección 5.1 se presenta una introducción al problema de comunicación y gestión de datos. A continuación, en la sección 5.2 se definen los módulos presentes en la solución planteada. En la sección 5.3 se detalla el módulo central de control y gestión de las cargas. Por último, en la sección 5.4 se detalla la utilización de Khimo en el proyecto, los cambios necesarios en dicha plataforma y el protocolo necesario para su integración con el sistema de gestión de la demanda desarrollado.

### 5.1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LA COMUNICACIÓN Y GESTIÓN DE LOS DATOS

Para implantar una solución al problema de gestión de la demanda es necesario contar con un sistema que permita el análisis del consumo de energía eléctrica de un grupo de hogares y de la capacidad de suministro de energía eléctrica por parte del proveedor de servicio.

Por otro lado, y dado que el usuario final espera cierta calidad en el servicio eléctrico contratado, el sistema deberá definir a qué cargas destinar la energía eléctrica en base a las preferencias de uso definidas por los usuarios de las cargas. Esta definición del comportamiento del flujo de corriente eléctrica debe asegurar en todo momento la calidad de la red, evitando sobrecargas producidas por el aumento repentino en el consumo de energía eléctrica en un grupo de hogares.

Para garantizar la estabilidad de la red eléctrica, el sistema debe ser capaz de responder en tiempo real a las distintas circunstancias que se presenten. Dentro de estas circunstancias se encuentran, por ejemplo, la disminución de la capacidad de producción, una ruptura en la red eléctrica y otros. Para poder adaptarse a los cambios repentinos del estado de la red eléctrica es necesario contar con mecanismos que permitan estabilizar rápidamente el consumo mediante el uso de los controladores hogareños.

Para poder obtener los datos de consumo de las cargas hogareñas es necesario contar con mecanismos que permitan recabar y persistir los datos de consumo de un grupo de hogares. Dado que las cargas se encuentran físicamente dentro de los hogares, es necesario instalar infraestructura específica que permita la comunicación entre cada hogar y el sistema de gestión central. El dispositivo destinado a estar en los hogares es

el controlador de hogares presentado en el capítulo 4, que consiste en un dispositivo electrónico capaz de mantener una comunicación en tiempo real con el sistema de gestión central. El controlador es el encargado de reportar el consumo y permitir el control de las cargas hogareñas en tiempo real.

Dado que los datos a recabar se encuentran distribuidos geográficamente, y que en la gran mayoría de los casos las cargas no pueden ser accedidas físicamente por un operador, es necesario contar con el reporte de consumo y del estado de cada carga de forma remota. Esta constante comunicación con cada controlador genera un importante flujo de datos que debe ser tenido en cuenta a la hora de diseñar los protocolos de comunicación y el software del controlador.

Por otro lado, se debe minimizar la cantidad de datos persistidos y/o enviados a través de la red de datos para permitir optimizar el funcionamiento del sistema en su totalidad, evitando contratar o adquirir infraestructura más potente y costosa para lograr el mismo resultado.

Para la realización de este proyecto fue necesario integrar servicios ya existentes (provistos por la empresa Ikatu) con el sistema de gestión de la demanda desarrollado. Dicha integración permite modificar en tiempo real el flujo de energía eléctrica en la red mediante el control directo de las cargas controlables por el sistema de gestión de la demanda.

El comportamiento de la red está determinado por algoritmos computacionales desarrollados específicamente para la administración de consumo de energía eléctrica. Los detalles de estos algoritmos se presentan en el capítulo 6.

## 5.2 ARQUITECTURA DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE GESTIÓN DE LA DEMANDA

La solución al problema de gestión de la demanda propuesta en este proyecto presenta tres módulos independientes. Si bien cada módulo posee más de una función, se pueden distinguir: i) un módulo encargado de la comunicación con el controlador; ii) un módulo encargado de la persistencia y definición de acciones a tomar sobre las cargas; y iii) un módulo correspondiente al controlador de hogares.

En la Figura 11 se pueden apreciar los tres módulos que componen la solución al problema de gestión de la demanda: Khimo se corresponde con el módulo encargado de la comunicación con los controladores de hogares; EFEN se corresponde con el módulo encargado de la persistencia y definición de acciones y CONTROLADOR se corresponde con el controlador de hogares.

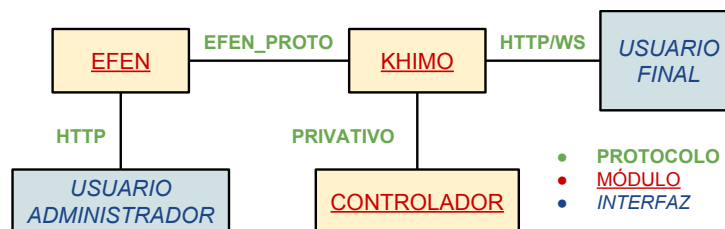


Figura 11: Arquitectura del sistema de gestión de la demanda.

### 5.2.1 *Khimo*

Khimo es un servicio web desarrollado por la empresa Ikatu (Gletin S.A.) que permite el control y el monitoreo del estado de los electrodomésticos del hogar de forma remota. Este servicio no contempla la medición y registro de los consumos de energía eléctrica de cada electrodoméstico, por lo cual resulta fundamental añadir esta funcionalidad para mejorar las capacidades de gestión de eficiencia energética de la plataforma.

En cuanto a la experiencia de usuario, Khimo ofrece interfaces para los usuarios y para los administradores del sistema. Las interfaces de Khimo permiten el control de las cargas por parte de los usuarios, así como también permiten personalizar y gestionar los proyectos por parte de los administradores.

En el contexto de este proyecto, el panel web de control brindado por Khimo es de extrema utilidad porque resuelve la interacción del usuario con sus cargas. Contar con dicha interfaz de usuario aceleró el desarrollo del prototipo de sistema de gestión de la demanda, ya que permitió enfocar el desarrollo en otras funcionalidades del sistema.

Khimo es el módulo encargado de brindar un canal de comunicación entre el controlador de hogares y el sistema de gestión de la demanda desarrollado en este proyecto. La comunicación entre Khimo y los controladores de hogares se realiza mediante la utilización de un protocolo privativo, estableciendo una conexión segura y de rápida respuesta con los controladores de hogares. La comunicación entre Khimo y el sistema de gestión de la demanda se realiza mediante un protocolo desarrollado para este propósito. Los detalles del protocolo de comunicación entre khimo y el sistema de gestión de la demanda se presentan en la subsección 5.4.1.

### 5.2.2 *EFEN*

El módulo central de gestión EFEN es un servicio desarrollado íntegramente en el contexto de este proyecto y está encargado de la persistencia de los consumos y de definir las acciones a tomar sobre cada carga controlada. El servicio EFEN cuenta con una interfaz web de gestión destinada al administrador del sistema, que permite el acceso directo al contenido de la base de datos, visualizar el histórico de consumo de las cargas y visualizar la agenda de acciones a realizar sobre las cargas mediante gráficas de acción/fecha.

Para lograr el control de las cargas y para obtener las mediciones de consumo por parte de EFEN, es necesaria la implementación de un protocolo de comunicación que permita la integración de EFEN con Khimo. Para lograr la integración de EFEN con Khimo se desarrolló el protocolo Efen\_proto. El protocolo Efen\_proto se especifica en la sección 5.4.

Los detalles del módulo central de gestión EFEN se presentan en la sección siguiente.

## 5.3 MÓDULO CENTRAL DE GESTIÓN EFEN

En esta sección se presentan las funcionalidades (subsección 5.3.1), el diseño (subsección 5.3.2) y la implementación (subsección 5.3.3) de EFEN.

### 5.3.1 Principales funcionalidades ofrecidas por EFEN

EFEN es el módulo central encargado de la persistencia de los datos relevantes al consumo de las cargas, de la definición de los conceptos involucrados en el problema de gestión de la demanda planteado en este proyecto y de brindar una interfaz de control que permita la visualización y modificación del estado del sistema. Además, EFEN es el módulo encargado de asegurar la estabilidad en la red y la calidad del servicio eléctrico de cada hogar.

Desde el punto de vista del usuario, EFEN es el encargado de brindar una interfaz sencilla y de fácil acceso para el control y monitoreo remoto de las cargas. Asimismo, EFEN permite la visualización del histórico de consumo de cada carga, facilitando la evaluación del comportamiento y el uso de las cargas a lo largo del tiempo.

EFEN define el concepto de hogar, que se corresponde con un grupo de cargas. Esta definición de hogar permite asociar un tope de potencia para el grupo de cargas que lo componen. El tope de potencia definido coincide con el contrato de potencia que el cliente haya solicitado a su proveedor de energía eléctrica. Considerar el límite de potencia que un hogar puede consumir en cada momento es de suma importancia a la hora de tomar decisiones sobre las cargas, ya que es necesario mantener el consumo por debajo de dicho valor para garantizar la calidad del servicio (evitando, de esta manera cortes en el mismo).

Asimismo, EFEN define el concepto de grupo de hogares, correspondiendo con la agrupación de dos o más hogares que estén conectados a la misma red eléctrica. La representación de grupo de hogares es útil para la definición de restricciones sobre el consumo de los hogares pertenecientes a dicho grupo. La definición de grupos de hogares permite el desarrollo de algoritmos que permitan la distribución equitativa de las acciones a tomar sobre las cargas de los hogares, disminuyendo la insatisfacción individual de cada usuario. Un hogar puede pertenecer a más de un grupo. Dentro de las restricciones más importantes a tener en cuenta se encuentra el límite de potencia para un grupo de hogares, siendo mandatorio mantener el consumo de cada grupo por debajo de su límite de potencia.

Dado que Khimo posee su propia definición de artefacto eléctrico hogareño, EFEN debe contar con mecanismos que permitan asociar el concepto de carga definido internamente con el concepto de artefacto eléctrico definido en Khimo. Esta asociación entre carga en EFEN y artefacto eléctrico en Khimo es necesaria para lograr el monitoreo y control de las cargas por parte de EFEN.

EFEN es el módulo encargado de la definición de la agenda de acciones a tomar sobre las cargas, por lo que debe contar con un mecanismo que permita acoplar algoritmos computacionales para este fin. La integración de los algoritmos computacionales se realiza a través de una API ofrecida por EFEN. Esta API permite acoplar distintos algoritmos de procesamiento de datos, logrando así la independencia entre el software de EFEN y los métodos para la definición de los comportamientos de las cargas. El procesamiento a realizar no solo involucra la definición de las acciones a tomar sobre las cargas controladas, sino que también permite acoplar software encargado del aprendizaje automático de sus patrones de comportamiento.

En cuanto al comportamiento de las cargas existen dos factores a tener en cuenta: el comportamiento de los usuarios respecto a su uso y los ciclos de funcionamiento de mismas. El ciclo de funcionamiento de una carga se corresponde con el patrón de consumo de energía eléctrica en función del tiempo. Los detalles de la implementación del ciclo de funcionamiento de una carga se presentan en la subsección 5.3.2. El comportamiento del usuario respecto al uso de la carga refiere a en qué momentos del día y en qué día de la semana el usuario utiliza el servicio otorgado por dicha carga. El uso por parte del usuario puede tener distintos grados de rigurosidad para diferentes momentos del día y de la semana. Con el fin de contemplar esta rigurosidad, EFEN permite clasificar cada estimación de uso de una carga en probabilidad alta, probabilidad media y probabilidad baja. Esta clasificación de uso permite calcular la insatisfacción del usuario como consecuencia del control automático de una carga en función de la probabilidad de su uso para un momento dado. El cálculo de la insatisfacción está fundada en el supuesto de que a mayor probabilidad de uso de una carga se espera mayor insatisfacción del usuario frente su control automático. En la tabla 3 se aprecia un ejemplo de clasificación de los usos de una carga en la semana. En el ejemplo se indica, entre otras cosas, que es altamente probable que el usuario utilice el servicio de la carga todos los martes entre las 6hs y las 8hs.

Hora	lunes	martes	miércoles	jueves	viernes	sábado	domingo
6	alta	alta	alta	baja	baja	-	-
8	media	-	-	baja	media	-	-
10	-	-	-	-	-	alta	alta
12	-	-	baja	-	-	media	media
14	-	-	baja	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	baja	-	-	alta	-
20	media	alta	media	media	alta	-	-
22	alta	alta	baja	baja	alta	-	-

Tabla 3: Probabilidad de uso de una carga en la semana.

El aprendizaje automático del comportamiento de las cargas no fue estudiado ya que escapa al alcance de este proyecto.

### 5.3.2 *Diseño de EFEN*

El diseño de EFEN fue realizado teniendo en mente una eventual extensión del sistema, facilitando así la posterior incorporación de nuevas funcionalidades. En la sección 7.2 (trabajo futuro) se detallan posibles extensiones a realizar en EFEN.

En su implementación actual, EFEN se compone de tres módulos:

**ConsumptionAdmin:** ConsumptionAdmin es el módulo encargado de modelar los hogares con sus respectivas cargas, el comportamiento de uso de las cargas y el comportamiento de cada una. Asimismo, ConsumptionAdmin define el concepto de grupo de hogares, que permite compartir hogares entre distintos grupos con el fin de representar edificios, barrios, zonas, etc.

Con el fin de mantener el bajo acoplamiento entre la implementación de diferentes funcionalidades, el módulo ConsumptionAdmin está separado en tres submódulos, los cuales se describen a continuación.

- El submódulo principal de ConsumptionAdmin define los grupos, los hogares, las cargas y los límites de potencia para dichos grupos y hogares. Asimismo, define una API para ser utilizada por los algoritmos encargados de la definición de las agendas de acciones. La API definida permite el acceso a la información contenida en la base de datos de EFEN de forma transparente para los algoritmos de generación de agendas de acciones.
- Un segundo submódulo define el comportamiento de cada carga y el patrón de uso de las cargas contenidas en un hogar. El patrón de uso de las cargas se puede definir para cada día de la semana, así como también se puede asignar una categoría configurable a cada día (día de trabajo, día libre, etc). El propósito de utilizar categorías configurables radica en el supuesto de que existe una relación entre el tipo de día y el impacto en la satisfacción del usuario frente al control automático de sus cargas, que puede ser tenido en cuenta a la hora de definir una agenda de acciones. Asimismo, este submódulo define el comportamiento en cuanto al consumo y ciclo de funcionamiento de las cargas mediante la representación genérica de un grafo de estados. En dicho grafo, cada estado posee el consumo, el tiempo necesario para cumplir su etapa y los posibles siguientes estados a los que se puede disponer determinada carga. En la Figura 12 se muestra un ejemplo de grafo para una carga interrumpible que posee dos estados: uno de los estados (acumulando calor) consume 1500 watts y requiere de 40 minutos para almacenar el total de calor, mientras que el segundo estado (perdiendo calor) consume 0 watt y requiere de 3000 minutos para perder el total de calor almacenado. Los valores de consumo y de tiempo de cada estado fueron aproximados a partir de valores experimentales obtenidos de un termotanque doméstico de 30 litros clase A.

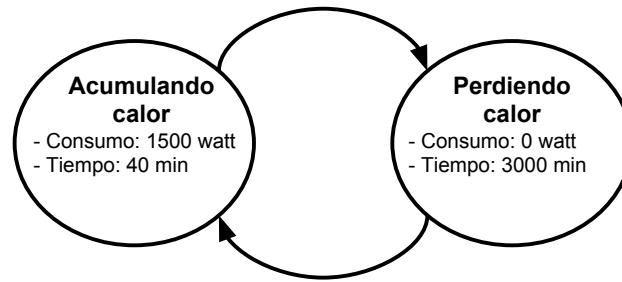


Figura 12: Modelo del comportamiento de una carga interrumpible que manipula calor, donde se refleja el consumo y el tiempo requerido para culminar la tarea en cada etapa.

- Por último, ConsumptionAdmin define un tercer submódulo encargado de la administración de las acciones a realizar sobre las cargas controladas. Este submódulo mantiene un historial de las acciones tomadas y brinda mecanismos para persistir las acciones a tomar en el futuro. Además, implementa la API ofrecida a los algoritmos encargados de la definición de la agenda de acciones y ofrece los métodos necesarios para ejecutar las acciones previamente definidas.

**enProvider:** Este módulo representa a los proveedores de energía eléctrica. Dado que algunos países cuentan con numerosos actores en el mercado eléctrico, este módulo permite definir más de un proveedor. Las principales funcionalidades de este módulo son proporcionar la predicción del precio de energía eléctrica por hora para una ventana configurable de tiempo y mantener el historial de estos precios para cada proveedor registrado en EFEN. En el modelo de planificación de eficiencia energética y de utilización de energía eléctrica propuesto en este trabajo es necesario contar con el pronóstico del precio de la misma, para lograr disminuir las tarifas de los clientes mediante la definición del comportamiento de las cargas controladas por EFEN.

**Conscli:** Este módulo es el encargado de la comunicación con Khimo. Conscli es un cliente del protocolo Efen.proto (que se describe en la sección 5.4), que permite enviar y recibir mensajes a las cargas controladas a través de Khimo. La comunicación permite mantener actualizados los cambios en el consumo de energía eléctrica de las cargas en la base de datos de EFEN.

Asimismo, Conscli es el módulo encargado del envío de comandos hacia las cargas, permitiendo la ejecución de las acciones en función de la agenda definida previamente. Las acciones contenidas en la agenda de acciones son iniciadas mediante la ejecución periódica de un script desarrollado en Python, el cual lleva a cabo las acciones no ejecutadas hasta la fecha de ejecución del script. Dicho script, ejecutado por un proceso periódico (cron) con una frecuencia configurable, obtiene las acciones a ejecutar desde la base de datos de EFEN y las envía a Khimo mediante el cliente del protocolo Efen.proto.

### 5.3.3 *Herramientas utilizadas para la implementación de EFEN*

La implementación de EFEN fue realizada utilizando el framework de desarrollo Django. En la subsección 4.5.2 se mencionan algunas de las funcionalidades ofrecidas por Django de interés para este proyecto.

Además, la decisión de utilizar Django está respaldada por el hecho de que dicho framework permite ser extendido mediante la integración de paquetes compatibles con Django. Dentro de las funcionalidades de interés que no son nativas a Django se encuentran: facilidades para el manejo de posicionamiento geográfico; la ejecución de código mediante scripts; entre otros. La facilidad de extender las aplicaciones implementadas en Django con nuevas funcionalidades favorece el rápido desarrollo y la rápida extensión de EFEN.

## 5.4 PROTOCOLO DE INTEGRACIÓN CON KHIMO

En esta sección se presenta el diseño e implementación del protocolo Efen\_proto utilizado para la integración de EFEN con Khimo. En la sección 5.4.1 se presentan los requerimientos y especificación del protocolo. En la sección 5.4.2 se presenta el diseño de la implementación de Efen\_proto para mantener un código robusto y de fácil mantenimiento.

### 5.4.1 *Requerimientos de Efen\_proto*

Para lograr la comunicación entre Khimo y EFEN se definió e implementó el protocolo Efen\_proto. Efen\_proto brinda un canal bidireccional de comunicación útil para la ejecución de acciones sobre cargas controladas a través de Khimo y permite mantener actualizados en tiempo real el estado y el consumo de las cargas.

Dado que Khimo centraliza la comunicación con las cargas hogareñas, Efen\_proto podría ser un cuello de botella en lo que respecta al flujo de datos entre Khimo y EFEN, ocasionando un deterioro en el desempeño del sistema en su totalidad. Por este motivo es de vital importancia diseñar el protocolo de forma de minimizar el flujo de datos enviados.

Para garantizar la velocidad de respuesta frente a un cambio en el consumo de una carga, Efen\_proto permite la suscripción a eventos, evitando la consulta intermitente del estado de las cargas por parte de EFEN. Los eventos a los que Efen\_proto permite suscribirse son los cambios de estados de las cargas, los cambios en el consumo de las cargas y los cambios en el estado de la conexión con el controlador de hogares.

Dado que la ejecución de las acciones sobre las cargas está controlada por un proceso que ejecuta periódicamente, el envío de las acciones pendientes a Khimo se realiza simultáneamente para todas las cargas que lo requieran. Esta agrupación de acciones implica que el número de cargas controladas por cada mensaje enviado sea muy superior al número de acciones distintas a ejecutar sobre dichas cargas. Para disminuir la redundancia de datos en los mensajes, Efen\_proto propone agrupar las cargas en base a las acciones a realizar, en lugar de agrupar las acciones en función de las cargas.

Para lograr la comunicación entre Khimo y EFEN es necesario extender Khimo para que soporte el protocolo Efen\_proto. El cliente de Efen\_proto utilizado en Khimo es el encargado del envío de los mensajes a los que EFEN esté suscrito y de la recepción y posterior ejecución de las acciones enviadas desde EFEN.

#### 5.4.2 Implementación de Efen\_proto

Efen\_proto se diseñó e implementó en capas, manteniendo separada la lógica del protocolo y el canal de comunicación utilizado. El canal utilizado en este proyecto es una conexión TCP, asegurando así la correctitud de los datos transmitidos de origen a destino.

Durante el desarrollo del protocolo se priorizó la implementación de código genérico y reutilizable, facilitando su extensión y/o modificación. Este enfoque de implementación permite homogeneizar el chequeo de consistencia y el procesamiento de los mensajes recibidos, permitiendo mantener un código claro y de fácil mantenimiento.

El funcionamiento de los clientes de Efen\_proto puede asimilarse con un diccionario, donde la clave es la codificación en texto plano del comando y el valor es una función de callback. Con esta metodología se logra centralizar el chequeo de formato de paquetes, para luego ser derivados a la función correspondiente en caso de ser correctos. Este diseño implica que los comandos implementados por cada cliente esté definido en el código del cliente. La definición de los comandos en el código permite que los clientes de Efen\_proto para Khimo y para EFEN sean el mismo código (con la salvedad de la definición del diccionario de funciones de callback).

### 5.5 FACILIDADES PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE CONSUMO

EFEN ofrece métodos de utilidad a la hora de analizar la factibilidad de la agenda de acciones. Dentro de los métodos de evaluación de la agenda de acciones se encuentran la evaluación de la insatisfacción del usuario y su costo monetario.

La insatisfacción del usuario, por ejemplo si se gestiona un termotanque, se calcula en función de la diferencia entre la temperatura que se estima que la carga poseerá según las acciones definidas, y la esperada por el usuario para el momento de utilizarla. Concretamente, es la diferencia de temperatura que posee el termotanque respecto a la que espera el usuario para la hora de utilizar el agua caliente. Por su parte, el costo de ejecutar una agenda de acciones depende del costo de la energía para cada hora implicada.

Por otro lado, EFEN también ofrece métodos de utilidad para la evaluación de la cantidad de energía almacenada en cargas que funcionan mediante el almacenamiento de calor, como ser termotanques o acondicionadores de aire. Esta última funcionalidad es de extrema importancia a la hora de evaluar el impacto de interrumpir el funcionamiento de una carga destinada al manejo de calor. Al momento de decidir la interrupción de una carga es necesario conocer el tiempo que se necesitará poner en funcionamiento para alcanzar la temperatura que el usuario espera tener. Dado que la aislación térmica de los dispositivos hogareños no es perfecta, la interrupción de las cargas implica la pérdida de parte del calor almacenado. Esta pérdida de calor im-

plica calcular el tiempo necesario para alcanzar la temperatura objetivo al retomar el funcionamiento de la carga (ver sección 6.2).

Con el fin de probar la plataforma en su totalidad, se desarrolló un módulo de simulación de históricos de consumo para un número configurable de hogares, que permite definir los horarios de uso de las cargas para ser reflejado en el consumo de las mismas. Para facilitar la definición del histórico de consumo de las cargas se desarrolló una API para la generación de datos de prueba. Dicha API facilita la definición de datos de prueba ya que abstrae la lógica del ciclo de consumo de las cargas respecto a la lógica de la generación de datos simulados.

---

## DEFINICIÓN DE LA AGENDA DE ACCIONES

---

En este capítulo se presenta el problema a resolver para la definición de la agenda de acciones sobre las cargas, y los detalles de la implementación de los algoritmos utilizados en EFEN para dicho fin. En la sección 6.1 se presenta una introducción al problema de definir la agenda de acciones sobre las cargas. En la sección 6.2 se presentan los perfiles de consumo obtenidos mediante el controlador de hogares elaborado. En la sección 6.3 se presentan los criterios utilizados para la evaluación de las agendas de acciones. En la sección 6.4 se presenta el diseño y los resultados obtenidos por los algoritmos desarrollados.

### 6.1 EL PROBLEMA DE LA DEFINICIÓN DE LA AGENDA DE ACCIONES

Definir la agenda de acciones a realizar sobre las cargas implica realizar un análisis del uso de las mismas por parte de los usuarios y del perfil de consumo de las cargas. Las acciones definidas deben procurar el uso eficiente y la buena calidad de la red eléctrica en todo momento. Dado que el patrón de consumo de una región no es constante a lo largo del día, una forma de brindar estabilidad y predictibilidad a la red es homogeneizando la demanda energética para dicho período de tiempo. Para buscar la homogeneización del consumo de una región a lo largo del día es necesario desplazar los momentos en los que las cargas son puestas en funcionamiento. Este desplazamiento debe hacerse hacia horas en las que existe menor demanda de energía, buscando la disminución de los picos y el aumento de los valles de consumo de una región.

Para garantizar una buena calidad de servicio al cliente sin deteriorar la calidad de la red eléctrica, es necesario aplicar modelos matemáticos y algoritmos computacionales que permitan definir en tiempo real cómo administrar las cargas presentes en la red.

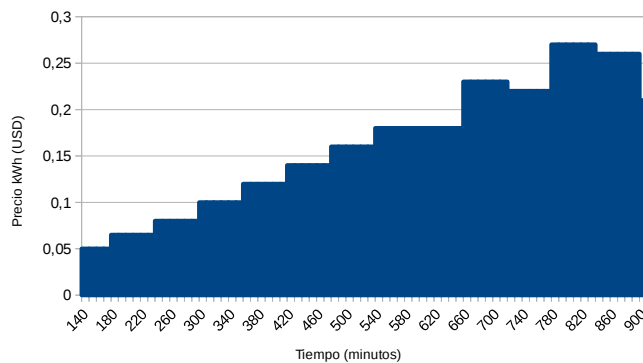
Los objetivos de administrar el consumo de las cargas son variados y contrapuestos. Por un lado se encuentran los intereses del proveedor de energía eléctrica, quien busca controlar la cantidad de energía consumida, brindando estabilidad y predictibilidad a la red. Predecir y planificar el consumo de la red eléctrica es de suma importancia para el proveedor, ya que permite la gestión de la producción de energía en base a esto. Asimismo, la planificación del comportamiento de las cargas debe estar condicionada por la capacidad de producción y la disponibilidad de energía eléctrica, buscando el balance entre el costo de abastecer a los clientes y el nivel de insatisfacción de los usuarios respecto al control automático de sus cargas.

Por otro lado, los intereses de los usuarios finales se relacionan con la disminución de los montos a pagar por la energía consumida y con el mantenimiento de la calidad

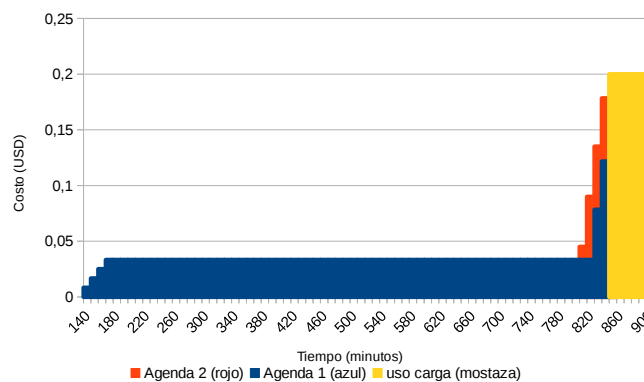
del servicio. Dado que para disminuir los costos es necesario controlar las cargas de los usuarios, es importante encontrar un balance entre la insatisfacción producida por el control involuntario de las cargas y el beneficio económico generado al usuario.

A nivel general, la planificación redundante en un beneficio social común, porque disminuir los costos de producción de energía eléctrica favorece la disminución de las tarifas que deben pagar los usuarios.

La Figura 13 presenta la comparación del costo de dos agendas de acciones en función del precio de la energía eléctrica. En la Figura 13a se aprecia el costo en dólares de la energía eléctrica entre las 2 AM y las 15 PM aproximadamente. En la Figura 13b se comparan dos agendas de acciones para la misma carga. Concretamente, las agendas plantean dos posibles formas de administrar un termotanque con el fin de conseguir la temperatura esperada a una determinada hora del día. En dicho ejemplo, el usuario espera usar el agua caliente desde las 14:10hs a las 15:00hs (del minuto 850 al 900), período señalado con el color mostaza. Con color azul (agenda 1) se señala el costo acumulado, producto de ejecutar acciones que buscan minimizar el costo de utilizar la carga. Por otro lado, en color rojo (agenda 2) se señala el costo de satisfacer al usuario minimizando la cantidad de energía consumida por la carga.



(a) Precio del kWh por hora.



(b) Comparación del costo de ejecutar dos agendas de acciones sobre la misma carga (termotanque).

Figura 13: Relación entre las agendas de acciones y el costo de la energía eléctrica.

En la Tabla 4 se comparan ambas agendas detallando el tiempo que la carga queda consumiendo y el costo de ejecutar cada agenda. De la comparación del costo de ambas agendas de acciones se puede apreciar que la agenda 1 es más conveniente en cuanto a valor monetario, pero la agenda consume más energía a lo largo del día (60 minutos consumiendo), mientras que en la agenda 2 se consume menos energía pero el costo de utilizar la carga es mayor (40 minutos consumiendo).

Agenda	Tiempo consumiendo (minutos)	Costo total (USD)
Agenda 1	60	0,12
Agenda 2	40	0,18

Tabla 4: Comparación del costo y tiempo de uso entre dos agendas de acciones para la misma carga.

Dado que las acciones a realizar sobre las cargas dependen fuertemente del tipo de carga que se esté manipulando, es necesario analizar por separado el impacto de tomar acciones sobre cada tipo de carga. En el contexto de este proyecto el foco se pone en las cargas interrumpibles que administran energía calórica, concretamente en el control de termotanques y acondicionadores de aire.

En el caso de las cargas interrumpibles que conservan calor, apagarlas implica una pérdida de calor debido a que su aislación térmica no es perfecta. Dicha pérdida debe ser tomada en cuenta a la hora de definir la agenda de acciones con el fin de satisfacer la temperatura esperada por los usuarios.

Para permitir el procesamiento del tiempo que toma acumular o perder el calor almacenado por las cargas se debe contar con los datos necesarios respecto a su funcionamiento. Dentro de los datos necesarios se encuentra el tiempo que le toma a una carga obtener el calor objetivo al estar encendida y el tiempo que le toma perder la totalidad del calor en caso de estar apagada. Los tiempos implicados en la acumulación y en la pérdida de calor son específicos para cada carga, ya que dependen de la temperatura ambiente, de la calidad del aparato, de la técnica utilizada para la conservación del calor, de la sustancia que se manipule, y de otros factores. Dado que el funcionamiento de cada carga es específico, es conveniente contar con algoritmos computacionales que permitan el aprendizaje automático de su funcionamiento en base a un histórico de consumo. Contar con mecanismos para el aprendizaje automático del funcionamiento de las cargas permite calcular la agenda de acciones que mejor se ajusta a sus características. Asimismo, dado que la especificación manual del funcionamiento de cada carga es un trabajo tedioso y poco atractivo, aprender automáticamente su comportamiento mejora la experiencia de uso por parte de los usuarios.

Con el fin de acotar el alcance de este proyecto de grado, los algoritmos desarrollados se centran en cargas interrumpibles que manipulen calor, por ejemplo, termotanques, acondicionadores de aire, etc. Estas cargas son de suma importancia porque impactan fuertemente en el consumo hogareño [23].

## 6.2 PERFILES Y CICLOS DE CONSUMO DE LAS CARGAS HOGAREÑAS

Los perfiles de consumo de los electrodomésticos se obtuvieron de la base de datos de EFEN. El reporte del consumo de los electrodomésticos se realizó mediante el prototipo de controlador de hogares para eficiencia energética desarrollado en este proyecto.

En la Figura 14 se presenta el consumo de un termotanque de clase A de 30 litros monitoreado con el controlador de hogares. El termotanque analizado demora aproximadamente 40 minutos en calentar agua desde 18°C a 50°C. Luego de alcanzar 50 grados, el termotanque se apaga y se enciende por 5 minutos de forma intermitente cada 6 horas aproximadamente.

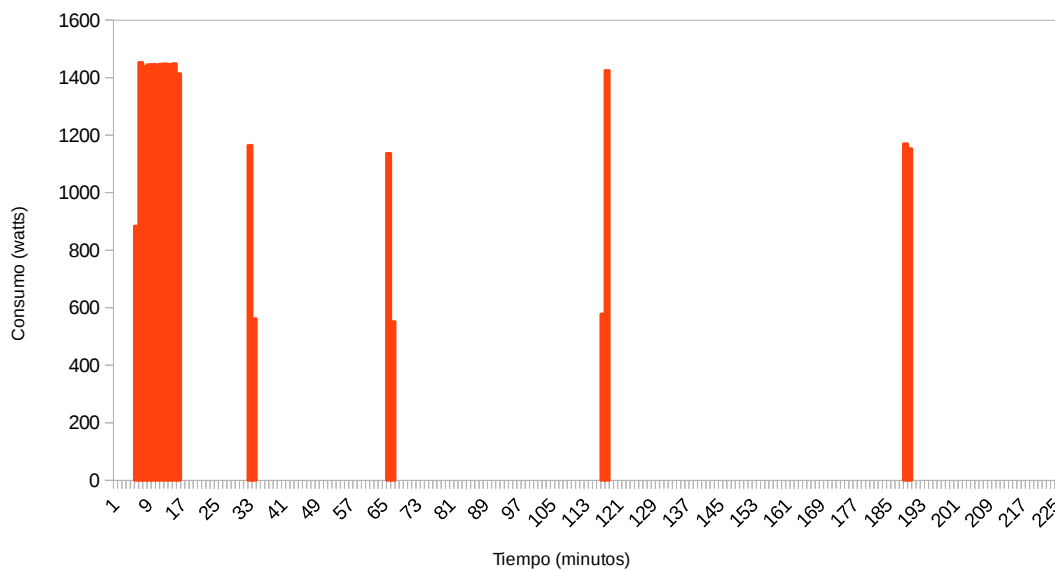


Figura 14: Perfil de consumo de un termotanque de 30 litros clase A con temperatura objetivo de 50 grados.

Dado que la capacidad calórica del agua es prácticamente constante entre los 0°C y los 100°C, y bajo el supuesto de que la resistencia que utilizan los termotanques para calentar el agua alcanza temperaturas mucho mayores a los 100°C, es factible suponer que existe una relación lineal entre el tiempo que un termotanque se encuentre encendido y el calor que se acumula en dicho tiempo. Por lo tanto, considerando los valores del tiempo total que requiere el termotanque para alcanzar la temperatura objetivo, y el período con el que el termotanque nivela la energía calórica perdida, se concluye que el termotanque pierde aproximadamente un 12 % de su energía calórica cada 6hs.

Si la carga pierde el 12 % de su energía en 6hs y el agua pierde/adquiere linealmente la energía (suponiendo que la temperatura de la resistencia es mucho mayor a 50°C), puede estimarse que, por ejemplo, en 9 horas de apagado el termotanque se perderá un 18 % de la energía calórica. Por lo tanto harán falta 7,5 minutos para alcanzar nuevamente el total de energía almacenada.

En EFEN, la lógica del funcionamiento de un termotanque se modela con dos estados, encendido o apagado, indicando en cada etapa el tiempo que le toma acumular o perder el total de calor. A partir del tiempo que le toma a la carga almacenar el total de calor esperado se puede estimar la cantidad de energía calórica acumulada en un tiempo dado. Asimismo, a partir del tiempo total que requiere una carga para perder el calor conservado es posible estimar el porcentaje de calor perdido en un período de tiempo dado. Esta capacidad de estimar el calor almacenado en las cargas permite tomar decisiones sabiendo si se está cumpliendo con la exigencia del usuario. En el caso de que no se cumpla con lo esperado por el usuario es posible saber cuánto tiempo es necesario encender la carga para completar el calor que falte.

En la gráfica de la Figura 15 se aprecia el perfil de funcionamiento de una heladera clase A, reportando las variaciones en el consumo a lo largo del día. Las variaciones en el consumo se deben al cambio entre las diferentes funcionalidades del dispositivo (hacer hielo, descongelar, etc.) y de la interacción con los usuarios (apertura de la puerta). Este comportamiento, y en particular la diferencia entre el máximo y el mínimo de potencia que consume y lo poco predecible de los momentos de cambio del consumo, implica un desafío importante a la hora de predecir la demanda de energía eléctrica total de un hogar. Asimismo, dado que el consumo de la heladera no es constante, es posible evitar la puesta en funcionamiento de las demás cargas en los momentos que la heladera demanda mayor cantidad de energía eléctrica. Por otro lado, dada la predicción de consumo de la heladera, puede detenerse brevemente su funcionamiento para permitir el uso de cargas que tengan mayor prioridad para el usuario.

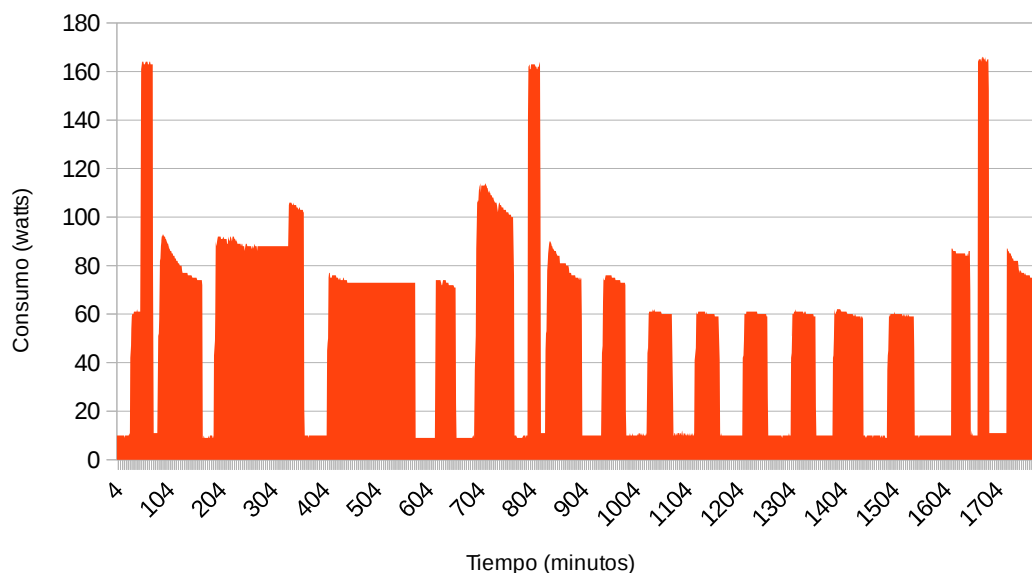


Figura 15: Perfil de consumo de una heladera con freezer clase A.

### 6.3 MÉTRICAS PARA LA EVALUACIÓN DE UNA AGENDA DE ACCIONES

Dada la especificidad respecto al consumo y comportamiento de cada carga, EFEN incluye métodos que permiten abstraer dichos comportamientos con el fin de facilitar el desarrollo de los algoritmos destinados a la definición de la agenda de acciones. Con el fin de evaluar la satisfactibilidad de una agenda de acciones, se implementaron métodos que permiten estimar el nivel de satisfacción del usuario y el nivel de aprovechamiento de la energía eléctrica producto de la ejecución de cierta agenda de acciones. A continuación se detallan los criterios para evaluar agendas de acciones utilizadas en este proyecto.

1. *Evaluación de la satisfacción del usuario:* La evaluación de la satisfacción del usuario se realiza penalizando cada minuto en que la carga no tenga el valor de la temperatura esperada. La insatisfacción se calcula como el producto entre la probabilidad de uso de una carga y la cantidad de minutos en los que dicha carga no contenga la temperatura deseada. La probabilidad de uso de una carga puede definirse explícitamente por el usuario o puede calcularse analizando los patrones de uso mediante mecanismos de aprendizaje automático.
2. *Evaluación de la energía eléctrica desperdiciada:* Dado que los dispositivos que manipulan calor pierden energía al encontrarse apagados, resulta útil establecer una relación entre la energía eléctrica invertida en calor y el tiempo en que el calor es perdido. Para establecer esta relación es posible discriminar si el calor acumulado en cierto momento del día realmente será utilizado por el usuario. Por ejemplo, si el usuario utiliza una carga a las 17hs y la carga pierde el 25 % de calor cada 10 minutos, la energía eléctrica utilizada para acumular calor hasta las 16:20hs es desperdiciada, en otras palabras, el calor acumulado hasta las 16:20hs no será utilizado por el usuario.

Por otro lado, EFEN ofrece métodos que permiten obtener el histórico de consumos promediando los valores en intervalos de tiempo configurables. Por ejemplo, es posible obtener el histórico de consumo de una carga en un año promediando el consumo por mes. Esta funcionalidad es de utilidad a la hora de procesar los datos, ya que permite especificar la precisión de los valores de consumo que se considere adecuada.

### 6.4 ALGORITMO PARA LA DEFINICIÓN DE LA AGENDA DE ACCIONES

En esta sección se presenta el algoritmo desarrollado para la definición de la agenda de acciones (subsección 6.4.1) y se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la disminución del consumo de energía eléctrica (subsección 6.4.2).

#### 6.4.1 Definición de la Agenda de Acciones

El algoritmo desarrollado para la definición de la agenda de acciones se implementó con un enfoque ávido (*o greedy*). Este algoritmo busca minimizar el consumo de energía eléctrica y la insatisfacción del usuario tomando decisiones localmente óptimas. Como

restricción dura se considera una cota superior para el total de consumo de un grupo de cargas.

El funcionamiento del algoritmo es el siguiente:

1. Se crea una acción a tomar en función de los momentos de uso de las cargas definidas en EFEN. La primer acción creada por momento de uso es para almacenar el total de calor esperado, y las siguientes son para mantener el calor dentro de un rango aceptable durante cada momento de uso definido. A la acción creada se le asigna una prioridad equivalente a la probabilidad de uso de la carga.
2. Si la última acción creada genera conflicto con las acciones previamente definidas (se supera la potencia máxima contratada) se adelantan o atrasan las acciones involucradas en el conflicto, según la prioridad de uso de cada acción.
3. Si quedan momentos de uso de las cargas sin cubrir con acciones volver al paso 1, sino ir al paso 4.
4. Se persisten todas las acciones definidas en la base de datos de EFEN para ser ejecutadas cuando corresponda.

El funcionamiento básico del algoritmo se presenta en el Algoritmo 1. La definición de las acciones para cada uso (línea 2 del código) es realizada tomando en cuenta la pérdida energética de cada carga y la tolerancia del usuario respecto al uso de la carga con menor/mayor temperatura que la esperada. La primer acción para cada período de uso se define de forma de que la carga acumule el total de calor esperado, mientras que las siguientes acciones para el mismo período de uso buscan mantener la temperatura dentro de los rangos esperados. Por ejemplo, si el usuario desea utilizar el acondicionador de aire durante 5 horas y tolera una temperatura 10 % menor/mayor a la esperada, la primer acción acumulará el total de calor, mientras que las siguientes acciones apagarán el acondicionador de aire hasta que la temperatura varíe 10 % respecto a la temperatura objetivo y volverán a encender el acondicionador de aire hasta alcanzar la temperatura objetivo esperada. Esta estrategia para la definición de acciones busca minimizar el consumo de energía eléctrica y la insatisfacción del usuario.

**Algoritmo 1** Definición de la agenda de acciones

---

```

1: para todo uso definido en orden descendente de prioridad hacer
2:   Definir nueva acción
3:   si las acciones definidas superan la potencia permitida entonces
4:      $ca$  = acción que genera conflicto
5:      $ua$  = última acción definida
6:     mientras las acciones definidas superen la potencia permitida hacer
7:        $t$  = tiempo en conflicto
8:       si  $ca$  con misma prioridad que  $ua$  entonces
9:         adelantar  $ca$  un tiempo  $t/2$ 
10:        atrasar  $ua$  un tiempo  $t/2$ 
11:       si no
12:         atrasar  $ua$  un tiempo  $t$ 
13:       fin si
14:     fin mientras
15:   fin si
16: fin mientras
17: Persistir las acciones definidas en EFEN

```

---

Dado que en general las cargas que manipulan calor están construidas de forma de administrar eficientemente la energía, una posible estrategia para la definición de acciones es permitir que las cargas controlen el calor por sí mismas durante los períodos de uso definidos en EFEN. Sin embargo, no se utilizó dicha estrategia debido a la necesidad de tener certeza en la estimación del consumo de las cargas en todo momento. Para tener certeza sobre el consumo de las cargas y mantener el servicio otorgado es necesario imitar el comportamiento de las cargas para mantener la temperatura deseada, controlando explícitamente los momentos en que la carga consume energía eléctrica.

El algoritmo para la definición de acciones busca mantener el calor objetivo en las cargas para todo período de uso definido en EFEN, asumiendo un único uso por parte del usuario en ese período de tiempo. Asumir esto implica que el período de tiempo que la carga consume energía eléctrica se corresponde con el tiempo que tarda la carga en almacenar y mantener el calor para cada período de uso.

#### 6.4.2 Evaluación del algoritmo desarrollado para la definición de la agenda de acciones

En esta subsección se presenta una evaluación del algoritmo desarrollado para la definición de la agenda de acciones. La evaluación consiste en la optimización de consumos en base a las preferencias de uso de las cargas en escenarios de interés para este proyecto. Concretamente, se analiza un caso de estudio que plantea la redistribución del consumo de cargas interrumpibles, buscando la satisfacción del usuario y manteniendo el consumo de energía eléctrica por debajo del límite permitido. El estudio de este caso es relevante porque puede ser aplicado para disminuir el consumo y evitar los cortes de corriente en hogares uruguayos, en casos en que el total de consumo de las cargas de un hogar supera la potencia contratada.

El consumo de las cargas producto de utilizar el algoritmo encargado de definir la agenda de acciones se comparó con el consumo estimado obtenido mediante el simulador mencionado en la sección 5.5. Dicho simulador tiene la capacidad de simular el consumo de termotanques y acondicionadores de aire para un período de tiempo configurable. Dado que el consumo de un termotanque y de un acondicionador de aire está determinado por la frecuencia de su uso, es necesario considerar dicha frecuencia para generar datos cercanos a la realidad.

Para la evaluación del algoritmo desarrollado se definieron dos casos de estudio:

- i) optimización del consumo de un termotanque, presentando un escenario donde el objetivo es disminuir el consumo de energía eléctrica para satisfacer al usuario y
- ii) optimización del consumo simultáneo de las cargas de un hogar, presentando un escenario que busca satisfacer al usuario mediante el control de dos termotanques y un acondicionador de aire, donde el consumo de potencia contratada no permite el uso simultáneo de ninguna de las cargas.

*Optimización del consumo de un termotanque:*

El termotanque simulado consume 1500 watts, demora 40 minutos en completar la temperatura objetivo desde temperatura ambiente y tarda 8 horas en perder el total de la energía calórica almacenada. La tolerancia de pérdida de temperatura se definió en un 10 %. Esta definición de tolerancia junto con la velocidad de pérdida de calor del termotanque implican que la carga se encienda 4 minutos con un período de 48 minutos para mantener la temperatura dentro de los rangos aceptables.

En la Figura 16 se aprecia el consumo simulado de un termotanque con las características antes descritas. Esta simulación de consumo contempla un único uso del termotanque en el día por parte del usuario, y presenta el consumo generado con el fin de mantener la temperatura en dicho período de tiempo para un escenario con optimización y otro sin optimización del consumo.

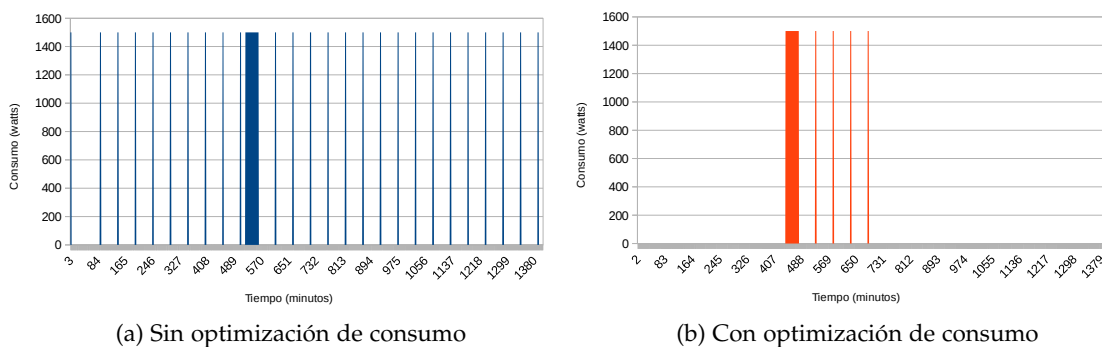


Figura 16: Consumo simulado para un termotanque utilizado una vez al día.

En la Figura 16a se aprecia el consumo simulado de un termotanque sin control automático que mantiene encendido el termotanque un total de 144 minutos en un período de 24 horas.

En la gráfica de la Figura 16b se presenta el resultado de agendar el uso del termotanque entre las 8:00 AM y las 12:00 AM. De la estimación de consumo producto de la agenda de acciones previamente mencionada se deduce que es necesario mantener encendido el termotanque un total de 56 minutos para satisfacer al usuario. Dado que el requerimiento por parte del usuario ante el termotanque (un uso por día) está satisfecho en la agenda presentada, se puede concluir que el algoritmo consiguió disminuir un 38.9 % (88 minutos menos) el tiempo que la carga permaneció encendida respecto al escenario sin optimizar.

*Optimización del consumo simultáneo de las cargas de un hogar:*

Con el fin de probar el resultado de aplicar el algoritmo para la definición de acciones en un escenario diferente, se definió un hogar con más de una carga. El máximo de potencia instantánea habilitado para el hogar se definió en 2200 watts, un valor extremo pero que permite visualizar el desempeño del algoritmo frente a un caso de poca potencia disponible. El hogar simulado está compuesto por dos termotanques y un acondicionador de aire. La tabla 5 presenta las características de las cargas definidas en EFEN. Dado el consumo de las cargas definidas y el máximo de potencia instantánea habilitada, no es posible el uso de dos o más cargas de forma simultánea.

	Termotanque	Acondicionador de Aire
Consumo (watts)	1500	2000
Minutos en almacenar	40	25
Minutos en enfriar	480	80
Frecuencia de mantenimiento	48	14
Minutos en mantener	4	2

Tabla 5: Resumen de las características de las cargas definidas en EFEN.

Los períodos de uso correspondientes a los termotanques poseen prioridad alta, y el período de uso del acondicionador de aire posee prioridad baja. Todos los períodos de uso definidos comienzan a las 8:00 AM (minuto 480) y culminan a las 12:00 AM (minuto 720).

En la gráfica de la Figura 17 se presenta el resultado de aplicar el algoritmo para la definición de la agenda de acciones al hogar. En la agenda solución se aprecia que se adelantan las acciones encargadas de acumular el calor esperado por el acondicionador de aire, ya que el uso de esta carga tiene prioridad baja. Asimismo, dado que los termotanques poseen prioridad alta, el período de tiempo en que se origina conflicto es reflejado en las acciones de ambas cargas, compartiendo la penalización de desplazar sus respectivas acciones. Concretamente, uno de los termotanques almacena el total de calor entre las 7:00 AM y las 7:40 AM y el otro entre las 7:40 AM y las 8:20 AM. Además, se aprecia la ausencia de consumos solapados por dos o más cargas, garantizando un consumo total por debajo del máximo habilitado para el hogar definido. Esta gráfica también refleja los períodos cortos de encendido de cada carga destinados a mantener el calor almacenado.

Por otro lado, del resultado de la ejecución del algoritmo puede apreciarse que el acondicionador de aire no podrá cumplir con el requerimiento establecido por el usuario, ya que los momentos de almacenamiento de calor (desde 6:33 AM hasta 7:00 AM) y encendido para mantener el calor (8:26 AM) están demasiado separados en el tiempo, implicando la pérdida total del calor almacenado. Asimismo, dado que la tolerancia del usuario es de un 10 % de la temperatura objetivo, el termotanque que comienza a almacenar calor a las 7:00 AM no podrá cumplir con la temperatura esperada por el usuario (90 %). Esta falta de temperatura es debido a que el termotanque pierde el 10 %

cada 48 minutos y permanece apagado por 66 minutos antes de la primer acción destinada a mantener la temperatura. Esto implica que le usuario utilizará ese termotanque con un porcentaje de temperatura estimado de un 86 % respecto a la temperatura objetivo (4 % menos respecto al admitido).

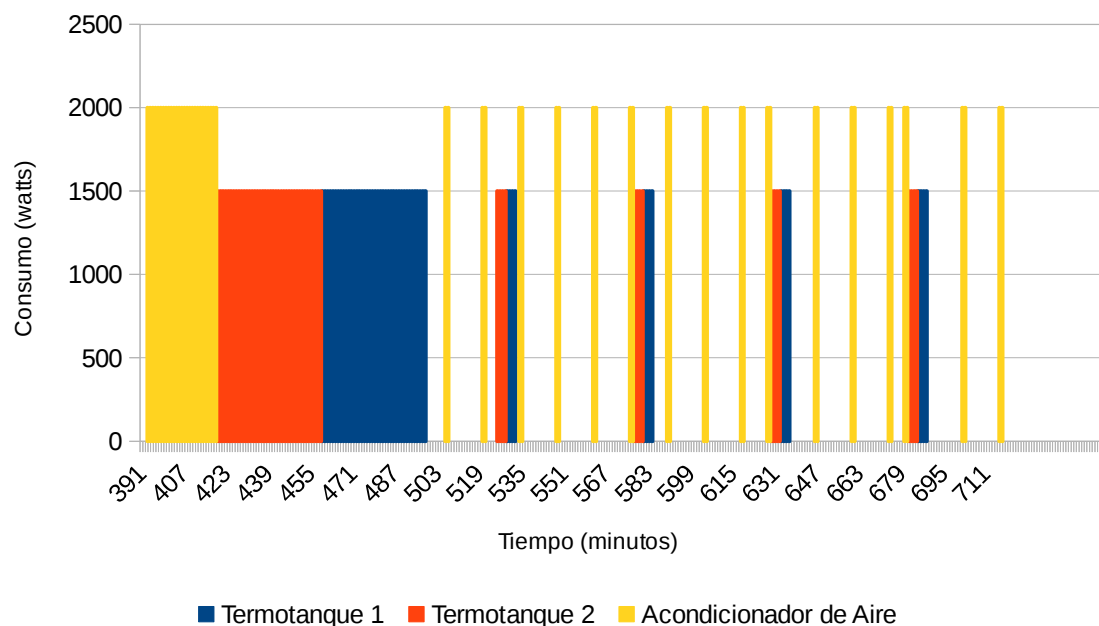


Figura 17: Predicción del consumo de las cargas administradas en base a la agenda de acciones definida por EFEN.

Si bien algunos de los resultados obtenidos a partir de la evaluación del algoritmo desarrollado no satisfacen al usuario en un 100 %, esta satisfacción es mucho mayor a la que se obtendría en el mismo escenario pero sin control automático de las cargas. Al no controlar el consumo de forma explícita puede suceder que dos o más cargas coincidan en los momentos en que consumen electricidad, superando el máximo de potencia contratada y produciendo un corte en el servicio eléctrico.

Dentro de las ventajas de permitir el control automático de las cargas se encuentra la posibilidad de incorporar nuevos dispositivos eléctricos al hogar, sin necesidad de aumentar el máximo de potencia contratada. Asegurar un consumo menor al máximo de potencia contratada se refleja en un beneficio económico para los usuarios, debido a que se evita contratar un servicio eléctrico de mayor potencia para incorporar nuevas cargas al hogar.

Por otro lado, la administración automática de las cargas dentro del hogar permite minimizar el total de energía eléctrica consumida y así disminuir las tarifas de los usuarios sin descuidar la calidad del servicio brindado.

---

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

Esta sección presenta las conclusiones del trabajo realizado en el marco del proyecto y las principales líneas de trabajo futuro.

### 7.1 CONCLUSIONES

Este proyecto de grado presenta el desarrollo de una solución completa y funcional al problema de la gestión de la demanda de consumo energético adaptable a diversos niveles urbanos (hogar, edificio, barrio, etc.).

Se estudió el problema de gestión de la demanda de energía eléctrica y se relevaron los principales trabajos de la literatura relacionada. Se identificaron las variables y las restricciones a considerar para optimizar el consumo de energía eléctrica de grupos de hogares, buscando mantener la satisfacción de los usuarios y la calidad de la red eléctrica. Asimismo, se identificó una clasificación para los dispositivos eléctricos hogareños que permite relacionar cada tipo de dispositivo con las posibles acciones a realizar sobre ellos. Esta clasificación permitió establecer la lógica utilizada para definir la agenda de acciones sobre cada tipo de carga, respetando sus ciclos de funcionamiento e intentando mantener la satisfacción del usuario.

La solución desarrollada en el marco del proyecto para el problema de gestión de la demanda está compuesta por un prototipo de controlador de hogares para eficiencia energética, un sistema de gestión capaz de controlar los prototipos desarrollados, un algoritmo para la definición del comportamiento de las cargas y un generador de datos simulados.

El controlador de hogares permite controlar y medir el consumo de energía eléctrica de diversos dispositivos eléctricos hogareños en tiempo real. El hardware del controlador de hogares se desarrolló mediante kits de desarrollo de dispositivos electrónicos. El controlador está compuesto principalmente por una RPi, un chip stpm01/10 para medir el consumo y un relé para controlar el flujo de corriente eléctrica. Asimismo, el controlador permite controlar una PDU CyberPower que se encuentre conectada a la misma LAN.

El sistema de gestión desarrollado tiene el propósito de definir el comportamiento de las cargas hogareñas. Este sistema de gestión implementa un canal de comunicación en tiempo real con los controladores de hogares para llevar a cabo la gestión del consumo de las cargas. La definición del comportamiento de las cargas se realiza mediante la ejecución de los algoritmos integrados al sistema de gestión mediante la utilización de una API desarrollada en este proyecto. Esta API permite independizar

la lógica del algoritmo utilizado respecto al software destinado a cumplir el resto de las funcionalidades necesarias para lograr una solución al problema de gestión de la demanda.

El sistema desarrollado implementa seis funcionalidades: i) la comunicación remota con los controladores de hogares a través de la plataforma Khimo; ii) la representación del concepto de hogar, grupos de hogares y de los límites de potencia para ambos conceptos; iii) la representación de la lógica de uso de cada carga por parte de los usuarios y del comportamiento respecto al consumo de energía eléctrica de cada carga; iv) la persistencia de datos en una base de datos configurable; v) una interfaz web para la administración y monitoreo del sistema de gestión; y vi) la representación de los proveedores de servicio de energía eléctrica con las respectivas predicciones de costo del kWh para las siguientes 24hs.

El algoritmo desarrollado para definir la agenda de acciones permite minimizar el consumo de energía eléctrica de cada carga en función de los momentos de uso definidos por los usuarios. El algoritmo obtiene los momentos de uso de las cargas, sus características de consumo de energía eléctrica y la cota superior de potencia para cada hogar y grupo de hogares mediante el uso de la API publicada por el sistema de gestión. Los principales resultados de la evaluación del algoritmo sobre un escenario simulado, en el que se controla un termotanque hogareño, muestran que se puede disminuir el consumo hasta un 38.9 % respecto a un escenario simulado sin gestión inteligente del consumo. Asimismo, los principales resultado obtenidos sobre un escenario simulado constituido por dos termotanques y un acondicionador de aire, donde el uso simultáneo de cualquiera de las cargas implicaría superar la potencia contratada, muestran que es posible administrar los momentos de encendido y apagado de las cargas para evitar un corte en el servicio eléctrico.

El generador de datos desarrollado permite definir todos los datos necesarios para utilizar el sistema de gestión. Estos datos simulados definen los hogares, los grupos de hogares, las cargas, los perfiles de uso de las cargas en la semana, el historial de consumo de las cargas y los proveedores de energía eléctrica.

El sistema desarrollado en el proyecto puede ser aplicado directamente en la realidad uruguaya. El sistema posibilita la gestión de la demanda de la energía eléctrica en función de los precios del kWh definidos por el proveedor del servicio. En el contexto de Uruguay, el proveedor del servicio eléctrico (UTE) está incorporando molinos de viento para la generación de energía eléctrica y anunció en 2016 un nuevo formato de contrato hogareño donde el precio del kWh varía por hora en función de la predicción de generación. Este contexto del servicio eléctrico en la realidad uruguaya ofrece un escenario muy favorable para la utilización del sistema desarrollado en este proyecto de grado para lograr nivelar la demanda a la capacidad de producción de energía eléctrica.

La gestión de la demanda de energía eléctrica permite disminuir las tarifas de los usuarios, lo cual los incentiva a incorporar esta tecnología en sus hogares. Además, la gestión de la demanda permite recuperar el costo, por parte de los usuarios, de la instalación de los controladores. Mediante un acuerdo con el proveedor de servicio, la instalación de los controladores en los hogares podría llegar a ser gratuita, permitiendo al usuario amortizar mensualmente el costo del controlador en función de lo ahorrado.

El constante aumento de dispositivos eléctricos hogareños ofrece un escenario ideal para la utilización de la solución desarrollada con el fin de conseguir la gestión integral de los servicios involucrados. La solución permite mantener la calidad de los servicios, utilizar eficientemente los recursos medioambientales, y administrar los consumos energéticos y los momentos de uso de los servicios para lograr un sistema sustentable y ecológico que permita mantener una buena calidad de vida de los ciudadanos.

## 7.2 TRABAJO FUTURO

A lo largo del proyecto surgieron varias líneas interesantes a abordar con el fin de mejorar y extender la solución al problema de la gestión de la demanda desarrollada en este proyecto.

Dada la vasta cantidad de funcionalidades que pueden incorporarse para mejorar la calidad de la automatización del comportamiento de las cargas, el diseño de EFEN contempla la posibilidad de extenderlo mediante la incorporación de nuevos módulos de software. El interés de extender EFEN radica en poder agregar módulos encargados del procesamiento de nuevos tipos de datos, como ser la ubicación geográfica de las cargas, el estado del clima, la interacción con el usuario final, etc., con el objetivo de alcanzar mayor precisión en la estimación de los usos de las cargas por parte de los usuarios. Asimismo, dentro de las posibles extensiones se propone incorporar otros tipos de servicios a planificar, por ejemplo gas, agua, etc.

Por otro lado, y buscando la independencia de otros servicios, otra línea de trabajo futuro es el desarrollo de un protocolo de comunicación que permita el control directo de las cargas por parte de EFEN. Esta independencia de otros servicios permite disminuir el flujo de datos enviados por la red y por lo tanto permite mejorar el desempeño del sistema en su totalidad.

Además, la incorporación del aprendizaje automático del uso de las cargas permite facilitar su configuración por parte de los usuarios. Este aprendizaje automático hace posible deducir los perfiles de consumo y las rutinas de uso de las cargas sin la intervención explícita de los usuarios con EFEN.

La solución propuesta es de utilidad considerando el interés de nuestro país, como de otros, en avanzar hacia una mayor eficiencia y eficacia de la gestión de la energía eléctrica que consumimos. Considerar las sugerencias de trabajo a futuro planteadas invitan a seguir avanzando en esa dirección.

#### AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue apoyado por el Centro de Innovación en Ingeniería (CII) en el marco de la convocatoria proyectos de innovación alumnos/empresas y la empresa contraparte Ikatu. El apoyo económico y el asesoramiento legal brindado por el CII fue de suma importancia para el desarrollo de este proyecto de grado. El asesoramiento brindado por el CII significó un crecimiento personal significativo respecto a los aspectos legales involucrados en el eventual desarrollo de un producto a partir de este proyecto. El asesoramiento técnico y las componentes de hardware brindadas por la empresa Ikatu fueron de suma utilidad para el desarrollo del controlador de hogares.

#### ACTIVIDADES DE DIFUSIÓN DE ESTE PROYECTO

Este proyecto se presentó en la edición 2015 del evento Ingeniería de Muestra realizado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Además, este proyecto se presentó en el Encuentro de Ciudades Inteligentes para la Inclusión realizado en noviembre del año 2015 en las salas del Centro de Conferencias de la Intendencia de Montevideo. Asimismo, este proyecto se presentó en el Workshop Internacional: "Planificación de Transporte y Ciudades Inteligentes" realizado en la Facultad de Ingeniería en noviembre del año 2015.

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Arduino. Arduino Uno. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>, 2016. [En línea; accedido 21-Setiembre-2016].
- [2] D. Balčinas and A. Kajackas. Transmission issues of the billing and dynamic power quality measures from the domestic sector. In *Proceedings of the Electrical Power Quality and Utilisation, 11th International Conference on*, pages 1–6, 2011.
- [3] Cyberpower. PDU Cyberpower PDU20SWHVIEC8FNET. <https://www.cyberpowersystems.com/products/pdu/switched/pdu20swhviec8fnet>, 2016. [En línea; accedido 21-Setiembre-2016].
- [4] Django Software Foundation. Django. <https://www.djangoproject.com/>, 2016. [En línea; accedido 17-October-2016].
- [5] Python Software Foundation. Python. <https://www.python.org/>, 2016. [En línea; accedido 17-October-2016].
- [6] Git. Git. <https://git-scm.com/>, 2016. [En línea; accedido 17-October-2016].
- [7] A. Gomes and A. Soares y C. Antunes. Impacts of demand side management and micro-generation units on low voltage distribution radial networks. In *Proceedings of the Electrical Power Quality and Utilisation, 11th International Conference on*, pages 1–7, 2011.
- [8] Cirrus Logic Inc.. CS5463. Single Phase, Bi-directional Power/Energy IC. [http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatasheet/CS5463\\_F3.pdf](http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatasheet/CS5463_F3.pdf), 2016. [En línea; accedido 21-Setiembre-2016].
- [9] Microchip Technology Incorporated. MCP3905A/05L/06A. Energy Metering ICs with Active Real Power Pulse Output. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22011B.pdf>, 2016. [En línea; accedido 21-Setiembre-2016].
- [10] S. Karnouskos. The cooperative internet of things enabled smart grid. In *Proceedings of the 14th IEEE international symposium on consumer electronics (ISCE2010), June*, pages 07–10, 2010.
- [11] STMicroelectronics. STEVAL-IPE016V1. Single-phase energy metering demonstration board with one current transformer and one shunt resistor based on the STPM1. [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data\\_brief/93/08/95/59/a9/2c/4f/a7/DM00045232.pdf/files/DM00045232.pdf/jcr:content/translations/en.DM00045232.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data_brief/93/08/95/59/a9/2c/4f/a7/DM00045232.pdf/files/DM00045232.pdf/jcr:content/translations/en.DM00045232.pdf), 2016. [En línea; accedido 21-Setiembre-2016].

- [12] STMicroelectronics. STPM01. Programmable single phase energy metering IC with tamper detection. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/6c/8b/e3/da/4a/8a/45/26/CD00044094.pdf/files/CD00044094.pdf/jcr:content/translations/en.CD00044094.pdf>, 2016. [En línea; accedido 21-Setiembre-2016].
- [13] C. Weiller. Plug-in hybrid electric vehicle impacts on hourly electricity demand in the United States. *Energy Policy*, 39(6):3766 – 3778, 2011.
- [14] P. Moura y A. de Almeida. Multi-objective optimization of a mixed renewable system with demand-side management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(5):1461 – 1468, 2010.
- [15] S. Blumsack y A. Fernandez. Ready or not, here comes the smart grid! *Energy*, 37(1):61 – 68, 2012.
- [16] A. Soares y C. Antunes y C. Oliveira y Á. Gomes. A multi-objective genetic approach to domestic load scheduling in an energy management system. *Energy*, 77:144 – 152, 2014.
- [17] P. Palensky y D. Dietrich. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(3):381–388, 2011.
- [18] C. Guille y G. Gross. A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. *Energy Policy*, 37(11):4379 – 4390, 2009.
- [19] E. Upton y G. Halfacree. *Meet the Raspberry Pi*. John Wiley & Sons, 2012.
- [20] D. Huang y R. Billinton. Effects of load sector demand side management applications in generating capacity adequacy assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(1):335–343, 2012.
- [21] A. Zakariazadeh y S. Jadid y P. Siano. Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: A multiobjective mathematical programming approach. *Energy Conversion and Management*, 78:151 – 164, 2014.
- [22] S. Gyamfi y S. Krumdieck y T. Urmee. Residential peak electricity demand response—highlights of some behavioural issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25:71 – 77, 2013.
- [23] A. Soares y Á. Gomes y C. Antunes. Categorization of residential electricity consumption as a basis for the assessment of the impacts of demand response actions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30:490 – 503, 2014.
- [24] A. Soares y Á. Gomes y C. Antunes y H. Cardoso. Domestic load scheduling using genetic algorithms. In *European Conference on the Applications of Evolutionary Computation*, pages 142–151. Springer, 2013.