



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

”Sistema Residencial de Administración de Energía basado en la Programación Óptima de Cargas”

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

(Opción: Instrumentación y Sistemas Digitales)

PRESENTA:

Ing. Carlos Alberto Moreno Bautista

DIRECTORES:

Dr. José Merced Lozano García

Dr. Víctor Javier Gutiérrez Martínez

Salamanca, Gto., a 21 de noviembre del 2017

M. EN I. J. ANTONIO ALVAREZ JAIME
COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES
P R E S E N T E.-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno (a) Carlos Alberto Moreno Bautista del **Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica** y cuyo número de NUA es: 145586 del cual soy director. El título de la tesis es: "Sistema Residencial de Administración de Energía basado en la Programación Óptima de Cargas".

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los dos sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE


NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO


NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS


NOMBRE Y FIRMA
PRESIDENTE


NOMBRE Y FIRMA
VOCAL

Dedicatoria

*A Dayanna, a mis padres Alberto Moreno e Isabel Bautista y a mi hermanita Mayra,
quienes incondicionalmente siempre me han apoyado, con mucho amor y cariño
les dedico todo mi esfuerzo y trabajo puesto para la realización de esta tesis*

Agradecimientos

Primeramente, doy gracias a Dios, por ser mi guía espiritual en cada paso que doy.

Gracias a mis padres, quienes han sido un pilar importante en todas las etapas de mi vida.

Gracias a mi hermanita Mayra, quien siempre ha sido mi gran motivación para salir adelante y lograr lo que me propongo.

Gracias a mi novia Dayanna, quien siempre ha creído en mí, apoyándome y motivándome siempre a seguir adelante.

Gracias a mis abuelas María y Omaira, quienes con su amor y ternura siempre me han inspirado.

Gracias a mi tío Víctor Julio, quien siempre me inspiró alegría, quien siempre me apoyó incondicionalmente en cada etapa de mi vida y que desde donde quiera que este, siempre será mi guía.

Gracias a toda mi familia, quienes siempre me han brindado palabras de aliento y quienes siempre han creído en mí y han estado presentes tanto física como espiritualmente en cada uno de mis logros.

Gracias, a mis asesores de tesis, los doctores José Merced y Víctor Gutiérrez. Gracias por su dedicación y apoyo. Quienes a través de sus conocimientos facilitaron la realización y culminación de este trabajo de tesis.

Gracias al Dr. Aviña, por brindarme su apoyo para venir a cursar esta maestría en México.

Gracias a Jesús Yáñez, por ofrecerme la oportunidad y el apoyo para venir a México a crecer profesionalmente.

Gracias a mi familia de amigos venezolanos en México que, de una manera u otra, me han brindado su amistad y momentos de alegría, Lorena, Eliana, Miguel, Andrés, Francine, José, Gayón, Gaby, Ricardo, Lubin, Guille, Flor, Carlos, Erika, Renny a todos gracias.

Por último, gracias a todas las personas que conocí en la Universidad de Guanajuato del campus Irapuato-Salamanca, por su amistad, atención y amabilidad brindada.

Agradecimientos Institucionales

Expreso mi más sincera gratitud hacia la Universidad de Guanajuato, especialmente a la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca por la formación y el apoyo que he recibido. Al Instituto Tecnológico de Morelia por permitirme realizar mi estancia académica. A todos los profesores mis agradecimientos por su duro trabajo durante estos dos años que me permitieron obtener el título de maestro en ingeniería.



También agradezco al CONACyT por la beca de estudios de maestría no. 718728 y a la DAIP de la Universidad de Guanajuato por el apoyo no. 020506-005 para mi estancia nacional.



Resumen

Este trabajo se enfocó principalmente en la problemática presente en el sector residencial en base a los altos niveles de consumo como consecuencia del uso desmedido de electrodomésticos y cargas de uso residencial tales como: estufas eléctricas, secadoras, máquinas de lavado, bombas de agua y sistemas de calefacción o aires acondicionados. Por otra parte, en sectores donde el cobro de consumo energético se maneja a través de tarifas y penalización económica por consumo inconsciente, es importante darles un uso apropiado a las distintas cargas conectadas al sistema residencial. En este sentido, se propuso un sistema de gestión energética dentro de los hogares (*Home Energy Management System*, conocido por sus siglas en inglés, HEMS) en base a un algoritmo genético (*Genetic Algorithm*, conocido por sus siglas en inglés, GA) multi-objetivo que sugiere al usuario final el uso adecuado del electrodoméstico con la finalidad de reducir sus niveles de consumo y altas facturas de electricidad a través de la reprogramación óptima de cargas, del aprovechamiento de energías renovables y de la inclusión de sistemas de almacenamiento de energía. Por otra parte, la construcción de un Frente de Pareto facilitó la evaluación del problema multi-objetivo que se plantea, garantizando un conjunto de solución óptimas que permitan al usuario la selección de la solución que mejor se adapte a sus requerimientos. Por último, los resultados simulados obtenidos han mostrado que mediante el HEMS que se propone es posible disminuir el pago por consumo y reducir los picos en las horas de alta demanda. Asimismo, garantizar un mejor aprovechamiento de las energías renovables y de las unidades de almacenamiento, estableciendo como prioridad el confort del usuario del sistema.

Abstract

This work was focused on a current problem within residential sector base on high levels of consumption as a consequence of the uncontrolled use of appliances and residential loads such as electric stoves, dryers, washers, water pumps, heating and air conditioner system. By another side, in sectors where the payment by energy consumption is driving by tariff and penalties because of the excessive consumption, it is important to give an appropriate use to the different residential loads connected to the residential system. In this sense, it was proposed a Home Energy Management System (HEMS) base on a multi-objective Genetic Algorithm (GA) that suggests to the household the appropriate use of the appliances with the aim of to reduce the consumption levels and the high electricity bills through the optimum load scheduling, exploitation of the renewable energies and storage systems. Also, the construction of a Pareto Front facilitated the evaluation of the multi-objective problem planted, it ensuring a set of optimal solutions that allow to the customer to select the best solution suited to your requirements. Finally, the simulated results obtained have shown that through the proposed HEMS is possible to decrease the payment by energy consumption and to decrease the peaks during high demand hours. Likewise, it is for ensuring a better leveraging of the renewable energies and storage systems, it establishing as a priority the household comfort.

Índice general

1. Generalidades	1
1.1. Introducción	1
1.2. Revisión del Estado del Arte	3
1.3. Justificación	7
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo General	7
1.4.2. Objetivos Específicos	8
1.5. Estructura del trabajo	8
2. Marco Teórico	10
2.1. Panorama Actual de la Demanda Energética	10
2.2. Redes Inteligentes (Smart-Grids)	11
2.2.1. Introducción de Nuevas Tecnologías	13
2.3. Sistema de Gestión Energética (EMS)	21
2.3.1. Funcionabilidad de un EMS	22
2.3.2. Sistema de Gestión Energético de nivel Residencial (HEMS)	23
2.4. Gestión del Lado de la Demanda (DSM)	24
2.4.1. Control y Nivelación de Carga	26

2.4.2. Componentes del DSM	27
2.5. Respuesta a la Demanda (DR)	28
2.5.1. DR no Basada en Eventos (No Despachable)	31
2.5.2. DR Basada en Eventos (Despachable)	32
2.5.3. Integración de los programas de DR	33
3. Algoritmos Genéticos	36
3.1. Problema de Optimización	36
3.2. Programación Heurística	37
3.3. Metaheurísticas	38
3.4. Algoritmos Genéticos	39
3.4.1. Codificación binaria	42
3.4.2. Cruce	42
3.4.3. Mutación	43
3.5. Función de Reparación	43
3.6. Problema de Optimización Multiobjetivo	44
3.6.1. Esquema en base a Pesos	44
3.6.2. Frente de Pareto	45
4. Modelados Matemáticos	47
4.1. Nano Red de nivel Residencial	47
4.2. Modelado de las DGUs	48
4.2.1. Modelo del aerogenerador	48
4.2.2. Modelo del panel fotovoltaico	51
4.2.3. Sistema de Generación híbrido	55

4.3. Actividad del Usuario	57
4.4. Cargas de Nivel Residencial	58
4.5. Unidad de Almacenamiento	68
4.6. Modelo de Optimización Multiobjetivo	73
4.6.1. Modelo Multiobjetivo en base a Pesos	75
4.6.2. Modelo Multiobjetivo en base a Frente de Pareto	75
5. Resultados	78
5.1. Consideraciones Generales	78
5.2. Validación del HEMS	80
5.3. Ventanas Operativas	87
5.4. Gestión de Modelos Dinámicos	90
5.5. Energías Renovables a Nivel Residencial	94
5.6. Unidad de Almacenamiento	98
5.7. Evaluación Multiobjetivo	102
6. Conclusiones y Trabajos Futuros	107
6.1. Conclusiones	107
6.2. Trabajos Futuros	108
Bibliografía	110

Índice de figuras

Capítulo I

1.1. Tendencia de consumo energético	4
--	---

Capítulo II

2.1. Jerarquía del sistema eléctrico actual	12
2.2. Prospectiva de las Smart-Grids	13
2.3. Areas de enfoque en las Smart-Grids	14
2.4. Estructura típica de una micro red	15
2.5. Operatividad de una DGU	18
2.6. Esquema operativo de un AMI	20
2.7. Esquema operativo de un HEMS	23
2.8. Sistema DSM	25
2.9. Objetivos y estrategias DSM	27
2.10. Esquema de los componentes del DSM	28
2.11. Clasificación de los programas DR	30
2.12. Planificación de generación en programas de DR	34

Capítulo III

3.1. Operadores básicos del GA.	41
3.2. Operador de penalización.	43
3.3. Frente de Pareto.	46

Capítulo IV

4.1. Operatividad de la turbina de viento escenario 1	49
4.2. Operatividad de la turbina de viento escenario 2	50
4.3. Operatividad de la turbina de viento escenario 3	50
4.4. Perfil de emperatura Constante para un panel solar	52
4.5. Operatividad del Panel Solar	52
4.6. Perfiles de Temperatura Simulados	53
4.7. Perfiles de Irradiancia simulados para Invierno y para Verano	54
4.8. Aporte Energético Invierno-Verano	54
4.9. Aporte Energético de Celdas Solares y Turbina de Viento	56
4.10. Perfil Híbrido de Disponibilidad Energética	56
4.11. Actividad del Usuario	57
4.12. Comportamiento Operativo de la Estufa Eléctrica	60
4.13. Comportamiento Operativo de la Secadora de Ropa	60
4.14. Comportamiento Operativo de la Maquina de Lavado	60
4.15. Comportamiento Operativo del Lavaplatos	61
4.16. Aporte Energético de Celdas Solares y Turbina de Viento	61
4.17. Comportamiento Operativo del Calentador de Agua	61
4.18. Comportamiento del Aire Acondicionado con Nivel de Tolerancia Permitido	64

4.19. Comportamiento del Aire Acondicionado sin Nivel de Tolerancia Permitido	64
4.20. Comportamiento del Calefactor Eléctrico con Nivel de Tolerancia Permitido	65
4.21. Comportamiento del Calefactor Eléctrico sin Nivel de Tolerancia Permitido	65
4.22. Comportamiento Operativo para todos los Electrodomésticos	67
4.23. Demanda por Hora y Total Acumulada	67
4.24. Proceso de Carga de la Unidad de Almacenamiento	71
4.25. Proceso de Descarga de la Unidad de Almacenamiento	72
4.26. Proceso de Carga y Descarga de la Unidad de Almacenamiento	73
4.27. Construcción del frente de Pareto-óptimo.	77
5.1. Intervalos de Cobro.	79
5.2. Validación del Funcionamiento Operativo de la Estufa Eléctrica en (kW/h)	81
5.3. Validación del Funcionamiento Operativo de la Secadora Eléctrica en (kW/h)	82
5.4. Validación del Funcionamiento Operativo de la Máquina de Lavado en (kW/h)	83
5.5. Validación del Funcionamiento Operativo del Lavaplatos en (kW/h) . .	84
5.6. Validación del Funcionamiento Operativo de la Bomba de Agua en (kW/h)	85
5.7. Demanda total de Energía Validación del HEMS propuesto	86
5.8. Estado Operativo de las Cargas Empleando Ventanas Operativas	88
5.9. Potencia Total Demandada	89
5.10. Gestión del Aire Acondicionado	91
5.11. Gestión de la Calefacción Eléctrica	93
5.12. Integración de las Energías Renovables	96
5.13. Integración de las Energías Renovables	100

5.14. Frente de Pareto	104
5.15. Soluciones presentadas para el aprovechamiento de la Nano Red	105
5.16. Soluciones Presentadas para el Aprovechamiento de la Nano Red	106

Índice de tablas

Capítulo II

2.1. Beneficios de los programas de DR	35
--	----

Capítulo III

3.1. Terminología genética y descripción computacional	40
--	----

Capítulo IV

4.1. Condiciones operativas de la turbina de viento	49
4.2. Parámetros operativos para el modelo del panel	51
4.3. Cargas Residenciales	58
4.4. Horarios Operativos de Cargas Residenciales	59
4.5. Intervalos Operativos de Cargas Residenciales	66
4.6. Parámetros operativos de la unidad de almacenamiento	71
4.7. Parámetros de Ajuste del GA	76

Capítulo V

5.1. Tarifas TOU	79
----------------------------	----

5.2. Intervalos Operativos para las Cargas Residenciales	80
5.3. Comparativa de consumo y costo obtenido del SRLS y del HEMS	87
5.4. Ventanas Operativas	88
5.5. Comparativa de utilidad de los electrodomésticos con y sin ventanas operativas integradas al optimizador en el HEMS propuesto.	90
5.6. Gestión del aire acondicionado implementando un control on/off y un control inteligente.	92
5.7. Gestión del calefactor eléctrico implementando un control on/off y un control inteligente.	94
5.8. Condiciones operativas para la turbina de viento	95
5.9. Parámetros operativos para el panel Solar	95
5.10. Condiciones Operativas de los Electrodomésticos para la Integración de la Nano Red	95
5.11. Comparativa de consumo y costo por inclusión de la Nano Red	98
5.12. Parámetros operativos de la unidad de almacenamiento	98
5.13. Condiciones operativas para la turbina de viento para Inclusión de DSU	99
5.14. Parámetros operativos para el panel Solar para Inclusión de DSU	99
5.15. Condiciones Operativas de los Electrodomésticos para la Integración de la Nano Red	99
5.16. Generación de la Nano Red	100
5.17. Comparativa de facturación	101
5.18. Nano Red Ideal	102
5.19. Comparativa de funciones objetivo	103
5.20. Comparativa del frente de Pareto	105

Capítulo 1

Generalidades

1.1. Introducción

Durante la última década, el estudio para el desarrollo de redes inteligentes (Smart-Grids) ha ido tomando cada vez más importancia dentro del campo eléctrico, considerando además los grandes beneficios que pueden aportar otras fuentes de energía alternativa, como lo son las energías renovables [1]. Estrategias de control y optimización, en conjunto con los sistemas de comunicación que se han integrado dentro de los sistemas eléctricos convencionales, han dado paso a la adopción del concepto de las Smart-Grids. Numerosos estudios han sido propuestos para controlar óptimamente el flujo energético dentro de las Micro-Redes, considerando tanto factores medio ambientales como económicos [2]. Por otra parte, de acuerdo a reportes realizados por el Departamento de Energía de Estados Unidos y la Comisión Energética de la Unión Europea, podría presentarse un incremento del 20 % al 40 % del total de energía consumida a nivel residencial y comercial en los próximos 10 años [3]. Por esto se ha centrado gran interés en buscar nuevas alternativas para reducir el consumo energético, pero buscando siempre suplir de manera óptima y económica la demanda energética.

En particular, un nuevo caso de estudio ha ido tomando fuerza en la actualidad, este se denomina Nano-Redes, y viene de la mano de las Smart-Grids. Aquí, se extrapola gran parte de los estudios y conocimientos aplicados dentro del área de las Micro-Redes para la gestión energética (*Energy Management*, conocido por sus siglas en inglés, EM)[4]. Las Nano-Redes se centran mayormente en la administración del flujo energético a nivel residencial, permitiendo una mayor autonomía energética, minimizando la dependencia del sistema eléctrico. De esta manera, se desarrollan sistemas que reducen el impacto ambiental ocasionado por las fuentes de generación convencionales, con un factor económico benéfico para el usuario [5].

Puesto que estudios en México muestran un incremento progresivo en el consumo energético a nivel residencial los últimos años [6], la Secretaría de Energía plantea la idea de fomentar el desarrollo de proyectos que enmarquen nuevas alternativas de generación energética dentro del país. Es por esto que surge la idea de proponer un sistema de gestión energética dentro de los hogares (*Home Energy Management Sistem*, conocido por sus siglas en inglés, HEMS), centrado en la gestión inteligente de los electrodomésticos de mayor demanda energética dentro de las casas. Donde, se espera aprovechar los beneficios de las fuentes de generación basadas en energías renovables, optimizando el uso de los electrodomésticos, y siguiendo un perfil económico basado en los costos actuales de la energía. En este contexto, el estudio de los HEMS [7] ha sido uno de los tópicos que ha recibido gran atención por parte de investigadores en todo el mundo, debido a los beneficios económicos y operativos que se pueden llegar a generar una vez haya madurado esta tecnología. A través de los HEMS se busca integrar al hogar fuentes de energías renovables, de las técnicas de eficiencia energética, técnicas de control optimizadas [8].

En la actualidad, gran parte de la energía producida proviene del uso de combustibles fósiles, y una muy pequeña parte de fuentes de energías renovables. Sin embargo, la dependencia de estos recursos fósiles junto con el incremento poblacional, constituyen una gran problemática sobre todo por el agotamiento progresivo de este tipo de recursos y el incremento preocupante de elementos contaminantes. Por otra parte, los costos generados por la creciente demanda energética son cada vez mayores, por lo que surge la necesidad de tener una apropiada y cuidadosa gestión energética en todos los sistemas eléctricos sin importar el nivel de potencia que manejen. En este sentido, el considerar la integración de fuentes renovables de energía como parte de las principales fuentes de generación dentro de las redes, es un aspecto que se ha vuelto imperativo dentro de las redes eléctricas modernas. Los nuevos conceptos de Micro-Redes y Nano-Redes eléctricas han alcanzado una relevancia notable a nivel mundial [8], por lo que en este momento constituyen un tópico muy prometedor y de gran potencial de desarrollo, principalmente en países como México donde recientemente se ha adoptado la estructura de mercado energético [6]. La inclusión de Micro-Redes dentro de las redes eléctricas convencionales permite un mayor aprovechamiento de los recursos renovables y disminuye la dependencia del sistema eléctrico, lo que se traduce en una reducción de los costos generados por el uso desmedido de la energía generada por medios convencionales.

Una micro-red convencional utiliza unidades de almacenamiento (*Distribute Storage Units*, conocido por sus siglas en inglés, DSUs), tales como baterías o vehículos eléctricos, y unidades de generación distribuidas (*Distribute Generation Units*, conocido por sus siglas en inglés, DGUs), en su mayoría basadas en la utilización de fuentes renovables de energía tales como aerogeneradores, paneles fotovoltaicos entre otros [2]. Así mismo, el creciente interés en el uso de energías renovables ha permitido el surgimiento de un gran número de técnicas y estrategias enfocadas a

lograr la gestión inteligente de la generación y distribución de energía dentro de una micro-red, a partir del control de los diferentes elementos que la conforman. Por otro lado, estrategias enmarcadas dentro del área de respuesta a la demanda como los algoritmos de programación de carga (Optimal Power Scheduling) [9], se han propuesto para optimizar el consumo energético de las diferentes cargas conectadas de manera local dentro de las Micro-Redes y Nano-Redes.

Es importante mencionar que uno de los objetivos principales que se tienen como parte de la operación de una Nano-Red, es la participación de los usuarios como elemento activo del sistema eléctrico. No obstante, aún cuando este tipo de tecnologías se vislumbren como una solución tecnológica al alcance de todos los usuarios, en un corto plazo, aún existen una gran cantidad de retos que afrontar, a fin de lograr su implantación dentro del sector residencial e industrial. Es por esta razón, que el objetivo principal del presente trabajo de tesis consiste en el desarrollo de un Sistema de Administración de Energía para Redes Eléctricas de Nivel Residencial (HEMS), basado en la ejecución de un algoritmo de optimización que contemple los perfiles de producción estimados para las fuentes renovables de energía y el control óptimo de las distintas cargas conectadas a la Nano-Red, para lograr un desempeño óptimo del sistema completo, a la par de la obtención de los mayores beneficios económicos.

1.2. Revisión del Estado del Arte

Los incrementos de la demanda energética en casi todas las áreas necesitan una cuidadosa y apropiada gestión de ésta. El fomento que se le da a las fuentes no convencionales viene dado por políticas energéticas motivadas por el cambio dramático y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Gestión del lado de la demanda (*Demand Side Management*, conocida por sus siglas en inglés, DSM) se ha propuesto como una serie de programas y acciones enfocadas a reducir el consumo energético, permitiendo operar las redes eléctricas de manera más eficiente. Al consumir energía de manera más eficiente los usuarios finales obtendrán una serie de beneficios que se traducen en una reducción de sus facturas energéticas sin sacrificar sus niveles de confort. Por su parte, las compañías suministradoras pueden operar sus redes de manera óptima permitiendo diferir inversiones en nuevas unidades de generación y líneas de transmisión y distribución, utilizando sus activos al máximo. Trabajos como en [10] la definen como un conjunto de programas para control energético, la eficiencia energética (*Efficiency Energy*, conocido por sus siglas en inglés, EE) y la respuesta a la demanda (*Demand Response*, conocida por sus siglas en inglés, DR) son empleados dentro de la DSM para el análisis y la gestión del consumo eléctrico. Otros trabajos como en [11–13] han desarrollado diversas investigaciones que parten de los programas DSM para gestionar adecuadamente la energía ya sea a niveles residenciales, comerciales e industriales, enfocándose en la implementación de diversas técnicas que garanticen la

mejor operatividad tanto del lado de los elementos de generación como del lado de la carga, buscando disminuir el consumo eléctrico y los costos por generación y altos picos de consumo.

Las exigencias energéticas se han ido incrementando progresivamente, y de la mano un aumento constante de los elementos contaminantes que se liberan al producir la energía que cubre con los requerimientos de los distintos usuarios conectados a la red eléctrica. Por otra parte, las tendencias de consumo eléctrico presentan un aumento progresivo a nivel residencial, mostrándose como una problemática que se debe abordar en los distintos mercados energéticos. Un ejemplo de ello se muestra en la figura 1.1 donde se establece una comparativa entre el consumo energético de nivel residencial versus los sectores comerciales e industriales, en este trabajo se describe la preocupación de los mercados eléctricos debido al incremento de la demanda energética en los hogares de Nigeria, ya que, al no poder cubrir con los requerimientos energéticos, interrupciones eléctricas forzadas son necesarias para disminuir con dicha demanda.

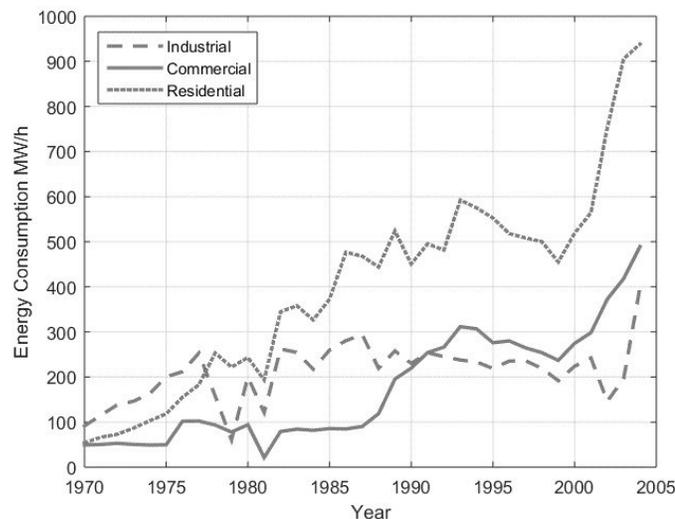


Figura 1.1: *Tendencia de consumo energético en Nigeria [14].*

Es por esto que se plantean nuevas alternativas para incentivar al uso de más energías limpias. De aquí, surge el concepto de las energías renovables y anudado a ello se plantean Micro-Redes tanto a nivel industrial y comercial, y Nano-Redes a nivel residencial. Algunos trabajos como [8] y [2] exponen las ventajas de este tipo de tecnologías respecto a beneficios ambientales y económicos, ya que no solo se reducen los elementos contaminantes, sino que también sirven como complemento de generación energética. En este sentido algunos trabajos exponen sus HEMS con el objetivo de promover la gestión energética a un nivel doméstico para atacar el crecimiento de la demanda eléctrica. Es por esto que se analizan a continuación algunos trabajos propuestos para la gestión energética residencial como solución a los altos niveles de consumo y a la operación de las redes eléctricas cerca de sus límites operativos.

En [15] los autores presentan un sistema HEMS en tiempo real que incluye modelos de cargas residenciales controlables, tales como calentador de agua eléctrico, aire acondicionado y secadora, adoptando también un sistema de almacenamiento de energía como batería y vehículo eléctrico, y un sistema de generación basado en una celda solar fotovoltaica. De igual forma consideran el efecto de las cargas no controlables conocidas como cargas críticas. Se propone un mecanismo de DR para que los sistemas residenciales donde las cargas residenciales pueden ser controladas durante los eventos de DR. Por otra parte, una de sus principales contribuciones es la de combinar la optimización deslizante (RO, del inglés *Rolling Optimization*) de 12 a 24 horas en adelante, y una estrategia de control en tiempo real (RTCS, del inglés *Real Time Control Strateg*) para reajustar el estado de las cargas cada minuto de operación del sistema residencial. Por último, se utiliza un controlador de lógica difusa para determinar la carga y descarga de la batería; se proponen condiciones de operación para asegurar los beneficios de operar la batería bajo el precio de la energía en tiempo real (*Real Time Pricing*, conocido por sus siglas en inglés, RTP). De esta manera el HEMS puede optimizar los horarios de utilidad de las cargas controlables durante los periodos de alta disponibilidad energética y precios bajos de la energía, y así poder disminuir el consumo de energía durante los períodos de alta fijación de precios según el RTP. Los resultados, tanto de las pruebas simuladas como de las implementadas en una plataforma física de laboratorio, indican que el enfoque propuesto puede optimizar el horario para las cargas residenciales y el comportamiento de la carga y descarga de las baterías. Aunque el aporte de este trabajo es amplio en términos de optimización y control en tiempo real, la optimización realizada solo en términos de precio limita el estudio al análisis de otros factores tales como consumo, confort y reducción de emisiones contaminantes.

En [16] se presenta un modelo de optimización multi-objetivo para la gestión energética a nivel residencial que puede ser incorporado fácilmente a tecnologías de Smart-Grids, dando una utilidad eficiente a las cargas residenciales en tiempo real, teniendo en cuenta los costos del gas y de la energía eléctrica en tiempo real y las preferencias del usuario. Se plantean modelos detallados de cargas de nivel residencial tales como iluminación, aire acondicionado, calefacción, refrigerador, congelador, estufa, calentador de agua, entre otros, además de la inclusión de modelos genéricos de paneles fotovoltaicos y dispositivos de almacenamiento con su gestión de carga y descarga. El problema de optimización busca minimizar a través de programación entero mixta (MILP, por sus siglas en inglés) costos por consumo energético y de gas, consumo eléctrico y emisiones contaminantes. Se plantean diversos casos de estudio para examinar el rendimiento de los modelos planteados. Por otra parte, se realizan pruebas en un hogar de una localidad de Ontario, Canadá, que valida la utilidad de la herramienta planteada. De igual forma los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas indican un ahorro del 20 % en costos de energía y una disminución del 50 % del total de energía consumida, manteniendo los niveles de comodidad deseados por el usuario. Esta propuesta representa una herramienta prometedora para resolver el

problema de gestión energética de nivel residencial atacando diversos problemas como lo son el precio de la energía y gas, consumo eléctrico y emisiones contaminantes. Por otra parte, la inclusión de una función multi-objetivo presenta una limitante respecto a la selección adecuada de los pesos que ponderan la importancia para resolver cada término de la función objetivo, por lo que establecer un conjunto de Pareto entre los distintos objetivos a solucionar como en [17], ampliaría la brecha a interactuar con otras técnicas de optimización heurística, y presentaría a su vez un grupo de diferentes soluciones sub-óptimas, dándole al usuario la libertad de escoger la solución que mejor se adapte a sus necesidades.

En [18] presentan una solución de gestión energética haciendo uso de optimización heurística como lo son los algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés), con el objetivo de investigar los beneficios económicos que traería una gestión adecuada de las cargas consideradas a nivel doméstico. Estos consideran un esquema de unidades de generación a pequeña escala basado en energías renovables, y un esquema RTP para optimizar el estado de las cargas, de manera que la factura de electricidad se minimice cumpliendo con las restricciones operativas que se les establecen a las distintas cargas. Aquí, la solución propuesta se evalúa a través de experimentos y simulaciones numéricas, mostrando la coordinación adecuada de las fuentes de generación y de las cargas, maximizando los beneficios económicos y la utilidad de las unidades de generación. Ahora bien, las soluciones presentadas muestran una mejor distribución de la carga dentro de los niveles de disponibilidad energética que proveen las unidades de generación, pero no presentan el impacto que tendría que emplear un sistema de almacenamiento de energía sobre la redistribución operativa de las distintas cargas. Por otra parte, los modelos de cargas considerados en la herramienta son ideales, por tanto, emplear modelos más detallados de algunos dispositivos de nivel residencial podría generar soluciones más reales, y mejorar la precisión en las predicciones obtenidas.

Por último, en [19] los autores presentan un diseño de hardware de gestión de energía a nivel residencial (SHEMS, por sus siglas en inglés), este incluye un sistema de comunicación ethernet y 4G, tecnología de sensado, y algoritmos de aprendizaje automático. Con el diseño que proponen, los consumidores pueden obtener una estrategia de control de cargas de nivel residencial en tiempo real sensible a los cambios de los costos de la energía. Se emplean modelos detallados de cargas a nivel residencial tales como calentador de agua, calefacción, ventilación y aire acondicionado, lavaplatos, lavadora, secadora y un sistema almacenamiento de energía o vehículo eléctrico. Además, los consumidores pueden interactuar con proveedores o entidades encargadas para el despacho de cargas (LSE, por sus siglas en inglés) para facilitar la gestión de algunas cargas del lado del proveedor. Anudado a esto, la SHEMS está diseñada para predecir las actividades del usuario, permitiendo al algoritmo establecer la gestión inteligente de las cargas, ayudando a los consumidores a disminuir su consumo energético. Con el fin de verificar sus resultados, presentan pruebas simuladas y reales que muestran la validez operativa del sistema SHEMS. Por otra parte, aunque el aporte

del sistema presenta eficientemente la utilidad de las cargas residenciales según la actividad del usuario y el RTP, solo emplea un vehículo eléctrico como disponibilidad energética en los periodos de máxima demanda, sin considerar la inclusión de un sistema de generación, lo que podría maximizar el ahorro tanto energético como económico del consumidor.

1.3. Justificación

Debido al uso desmedido de la energía a nivel residencial, se tiene la necesidad de implementar una metodología que permita la gestión óptima de algunas cargas residenciales que pueden representar un alto nivel de consumo en nuestros hogares. La revisión del estado del arte permitió conocer algunos sistemas que se han propuesto para la gestión energética a nivel doméstico, estos HEMS a través de la implementación de distintas técnicas de optimización, garantizan un mejor uso de los electrodomésticos ante diversos escenarios operativos. Sin embargo, los trabajos previamente estudiados dejan una brecha abierta para explotar este concepto, en la búsqueda de nuevas técnicas y análisis que mejoren el rendimiento de los sistemas presentados. Este trabajo de tesis aborda el concepto de los HEMS propuesto en la literatura, ofreciendo una estrategia de gestión energética de nivel doméstico que, a través de un optimizador basado en un Algoritmo Genético Multiobjetivo y la evaluación de un frente de Pareto, busca minimizar las funciones objetivo que se consideran para el problema bajo estudio. Esto permitirá no solo reducir el consumo en las horas pico de la demanda durante un día de actividad regular, sino también sugerirá un uso adecuado de las cargas residenciales que mejores beneficios económicos traigan a los usuarios del sistema.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

El presente trabajo de tesis se enmarca dentro del concepto de las Redes Eléctricas Inteligentes (Smart-Grids) y está enfocado al desarrollo de un Sistema de Administración de Energía para redes eléctricas de nivel residencial (HEMS), capaz de minimizar el costo por consumo energético mediante la utilización de algoritmos de programación óptima de cargas (Optimal Power Scheduling) y mecanismos de respuesta a la demanda. El elemento central del HEMS consistirá en un programador (scheduler) que, de acuerdo a la ejecución del algoritmo de optimización implementado, los valores de producción estimados para las fuentes generadoras de energía (Fuentes renovables de energía) y la predicción del consumo energético, determinarán la operación de las

diferentes cargas consideradas dentro de la Nano-Red.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Desarrollar modelos matemáticos de los diferentes elementos que se consideran como cargas dentro de la Nano-Red de nivel residencial, para contar con un simulador de consumo energético. A su vez, se desarrollarán modelos detallados de las fuentes renovables de generación de energía consideradas para el suministro de la Nano-Red, para implementar un simulador de producción energética.
2. Determinar modelos de generación y consumo de energía a partir de mediciones experimentales, utilizando técnicas de producción de datos.
3. Desarrollar una función objetivo, que incluya las restricciones individuales de las cargas, las tarifas dinámicas, así como los modelos de las unidades de generación (DGUs, por sus siglas en inglés) y almacenamiento (DSUs, por sus siglas en inglés).
4. Formular un algoritmo de optimización, que en conjunto con una estrategia de control en tiempo real, logren que el HEMS se desempeñe de forma satisfactoria ante ambientes operativos complejos y que sea capaz de lograr beneficios para los usuarios de la Nano-Red.

1.5. Estructura del trabajo

El trabajo de tesis se encuentra organizado en seis capítulos, los cuales se describen brevemente a continuación:

Capítulo I. En el primer capítulo se describen algunas generalidades, en este sentido se presenta una breve introducción, la revisión del estado del arte realizada, la justificación del trabajo y los objetivos planteados para resolver el problema bajo estudio.

Capítulo II. En el segundo capítulo se presenta el marco teórico, donde se conceptualizan algunos temas de importancia para la presente investigación incluyendo: el panorama actual de la demanda energética, las redes inteligentes, los sistemas de gestión energética, la gestión del lado de la demanda, y por último la respuesta a la demanda.

Capítulo III. En el cuarto capítulo se refieren algunos conceptos dentro del marco de optimización y los algoritmos genéticos abarcando: el problema general de

optimización, programación heurística y metaheurística, algoritmos genéticos, operador de penalización y el problema de optimización multiobjetivo.

Capítulo IV. En el cuarto capítulo se indica la metodología la cual abarca: el estudio de los elementos que componen a la Nano Red de nivel residencial empleada en esta investigación, la actividad del usuario, los modelos de las cargas de nivel residencial consideradas, el modelo de la unidad de almacenamiento, y el modelo de optimización multi objetivo con las respectivas restricciones para el problema bajo estudio.

Capítulo V. En el quinto capítulo se detallan las etapas que conforman el desarrollo del trabajo, y se presenta: validación del HEMS basado en GA, validación del HEMS con ventanas operativas, resultados de las pruebas simuladas para la calefacción eléctrica, resultados obtenidos con la integración de las DGUs, resultados obtenidos al incluir tarifas de cobro por tiempo de uso (*Time of Use*, conocido por sus siglas en inglés, TOU) contratadas, resultados obtenidos de la integración de una DSU, y por último los resultados obtenidos del frente de Pareto.

Capítulo VI. Por último, en el sexto capítulo se detallan las conclusiones acerca de los resultados obtenidos y los trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Panorama Actual de la Demanda Energética

La energía eléctrica es un insumo primario para la realización de las actividades productivas, de transformación y servicios de un país. En este sentido, el suministro eficiente de energía eléctrica a un costo accesible promueve la competitividad y la capacidad de las empresas e industrias para ofrecer más y mejores productos y servicios en el mercado, lo que acarrea a un impacto directo en el crecimiento económico [20]. De esta manera, cuando existe un crecimiento progresivo en la economía de una nación, la industria eléctrica crece en mayor proporción, ya que esta impulsa a las actividades productivas del país y satisface a un mayor número de usuarios.

Para el 2016 la capacidad instalada del sistema eléctrico en México fue de 73.510 MW, donde un 71.2% correspondió a centrales de generación eléctrica convencionales y el 28.8% restante a centrales de generación eléctrica con tecnologías limpias. En este sentido, los análisis estadísticos realizados en [21] para el 2016, indican que dicha capacidad presentó un incremento del 8.1% respecto a la capacidad registrada para el 2015. Por su parte, en materia de obtención de electricidad, para el 2017 según el banco mundial [22], México se ubica en la posición 98 de 190 economías mundiales. Sin embargo, este último estudio realizado mostró un retroceso de 26 posiciones respecto al reporte realizado para el 2016. En este sentido, el banco mundial recomienda a los gobiernos del mundo implementar nuevos estatutos y prácticas que contribuyan al desarrollo de un mercado eléctrico que permita el suministro eficiente y confiable de electricidad, con el objetivo de abrir nuevas oportunidades de inversión, promoviendo a su vez el crecimiento económico de cada nación.

La reciente prospectiva del sector eléctrico en México con una proyección 2017-2031 [21] surge de la iniciativa de promover la transición del sistema energético

actual hacia un sector eléctrico más eficiente y confiable. Aquí, se describe una nueva estructura que considera la planeación a mediano y largo plazo, estableciendo un nuevo mercado energético, que permite la admisión de particulares en las áreas de generación y comercialización, llevando a cabo una reestructuración de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Dicha prospectiva elimina el actual concepto de tarifas eléctricas establecidas por la CFE para el nivel industrial, comercial y doméstico, llevando el actual sistema de tarifas a un sistema de subasta energética, incentivando a la competencia de costos ofertados por parte de los distintos proveedores del nuevo sector eléctrico, sujetos a las reglas del mercado establecidas por la Secretaría de Energía (SENER) y la comisión reguladora de energía (CRE).

Por otra parte, el crecimiento de la demanda energética se debe tratar con detenimiento, ya que viene impulsado tanto por el crecimiento socioeconómico de las naciones como por el aumento de la población mundial [23]. En este contexto, la gran cantidad de recursos fósiles existentes hasta hace algunos años daban a suponer una gran línea de aprovechamiento para la generación energética. No obstante, en la actualidad son recursos no renovables, que se están agotando, y a su vez, el uso desmedido de estos implica un impacto negativo al medio ambiente, efecto que inicialmente no se consideraba, ya que, inicialmente, el principal objetivo era el de solo generar energía para satisfacer las exigencias energéticas por parte de los diferentes tipos de consumidores. Ahora bien, como se ha dicho, la energía es un recurso estratégico para cualquier economía, pero es urgente acelerar el desarrollo de tecnologías energéticas con bajas emisiones de elementos contaminantes para abordar los desafíos mundiales energéticos que se pronostican. Las redes inteligentes (Smart Grids) han tomado gran importancia hoy día ya que permiten la inclusión de nuevas tecnologías energéticas tales como las energías limpias, vehículos eléctricos y gestión del lado de la demandan (DSM) [12].

2.2. Redes Inteligentes (Smart-Grids)

La red eléctrica tal como la conocemos hoy en día, es producto del rápido crecimiento urbanístico y el desarrollo de infraestructuras del siglo pasado. Aunque cada país gestiona la energía por su cuenta, las compañías de servicios energéticos a nivel mundial han adoptado tecnologías similares. Sin embargo, el crecimiento de estos sistemas eléctricos se ha visto influenciado por factores económicos, políticos y geográficos propios de cada región. A pesar de estas diferencias, la topología base del sistema eléctrico existente ha permanecido sin muchos cambios. Tal como se explica en [24], la industria energética desde su creación ha operado con claras demarcaciones entre sus subsistemas de generación, transmisión y distribución, configurando distintos niveles de gestión.

En la Fig. 2.1 se presenta el sistema eléctrico estrictamente jerárquico, en el

que las centrales eléctricas en la parte superior de la cadena garantizan la entrega de energía a las cargas de los clientes en la parte inferior del esquema energético.

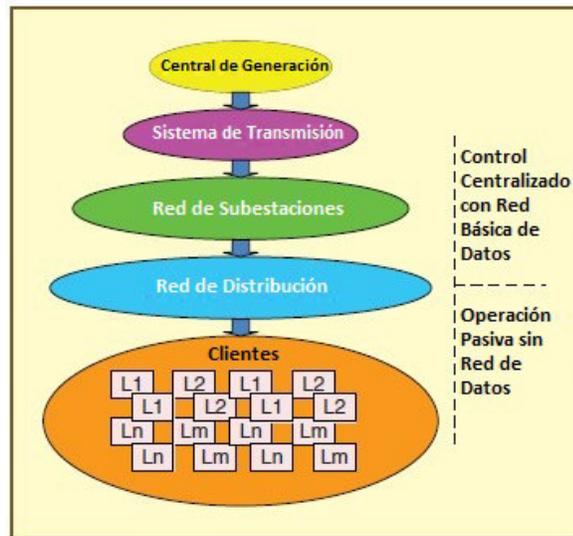


Figura 2.1: Jerarquía del sistema eléctrico actual [24].

En atención a los diferentes problemas que presenta el sistema eléctrico actual, surge el concepto de Smart-Grids como un sistema eléctrico de nueva generación. Una Smart-Grid se integra a los sistemas eléctricos convencionales con la finalidad de mejorar, el rendimiento, el control de flujo de potencia y la fiabilidad de este [25]. Por su parte, permiten la inclusión de protocolos y estándares de eficiencia energética y respuesta a la demanda que miden el ahorro económico y la reducción elementos contaminantes. En este sentido, en [26] mencionan que las Smart-Grids coordinan las necesidades y capacidades de todas las unidades de generación, operadores de la red, usuarios finales y mercados eléctricos para operar todas las partes del sistema de la manera más eficiente posible, minimizando los costos y el impacto medioambiental, maximizando a su vez la fiabilidad del sistema eléctrico. En la Fig. 2.2 tomada de [24] se presenta de manera general la prospectiva que se tiene de migrar el actual sistema eléctrico unidireccional a un futuro sistema eléctrico bidireccional. De esta forma se muestra lo que se manejaría bajo el concepto de Smart-Grids, ya que representan un conjunto de tecnologías que irán evolucionando a diferentes velocidades en diversos entornos alrededor del mundo, dependiendo del atractivo comercial que estas representen, compatibilidad con las tecnologías existentes, regulaciones energéticas y tasas de inversión.

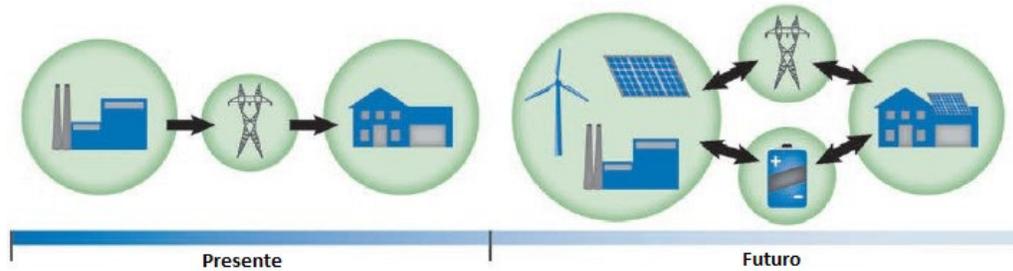


Figura 2.2: *Prospectiva de sistemas eléctricos convencionales a Smart-Grids [27].*

2.2.1. Introducción de Nuevas Tecnologías

Dado el hecho de que un gran porcentaje de todos los cortes de energía y perturbaciones tienen sus raíces en la red de distribución, el movimiento hacia las Smart-Grids ha tenido que comenzar desde el fondo de la cadena eléctrica, es decir desde el sistema de distribución [28]. Además, el rápido aumento del costo de los combustibles fósiles, junto con la incapacidad de las empresas de servicios energéticos para ampliar su capacidad de generación a ritmo de la creciente demanda de electricidad, ha acelerado la necesidad de modernizar la red de distribución mediante la introducción de tecnologías que pueden ayudar con la gestión energética [29]. La medición del sistema de distribución ha sido el foco de inversión de infraestructura más reciente. Proyectos anteriores en este sector introdujeron un sistema de lectura automatizado (AMR, por sus siglas en inglés) en la red de distribución [30]. AMR permitió a las compañías proveedoras de electricidad obtener de manera remota registros de consumo, alarmas, y estado de las instalaciones eléctricas de los clientes.

Aunque la tecnología AMR resultó inicialmente atractiva, las compañías eléctricas concluyeron que AMR no abordaba el principal problema: la gestión del lado de la demanda. Debido a que la AMR se desarrolló como un sistema unidireccional, limita sus capacidades únicamente a la lectura de los datos del medidor, impidiendo que las empresas suministradoras tomen medidas correctivas basadas en la información recibida de estos medidores. Debido a esto, los sistemas AMR no tuvieron mayor éxito, ya que no permiten la transición a las Smart-Grids, donde el control sobre todos los niveles de la red es una premisa básica. En [31] se describe que un sistema eléctrico totalmente optimizado desplegara todas las áreas tecnológicas mostradas en la Fig. 2.3. Sin embargo, no todas las áreas necesitan ser modernizadas para aumentar la inteligencia de la red.

La operatividad de una Smart-Grid se compone de un conjunto de tecnologías desarrolladas e implementadas de manera individual abarcando toda la red eléctrica, que va desde la generación, hasta la transmisión y distribución de energía a los diferentes tipos de consumidores conectados al sistema [27]. Es importante mencionar que, algunas

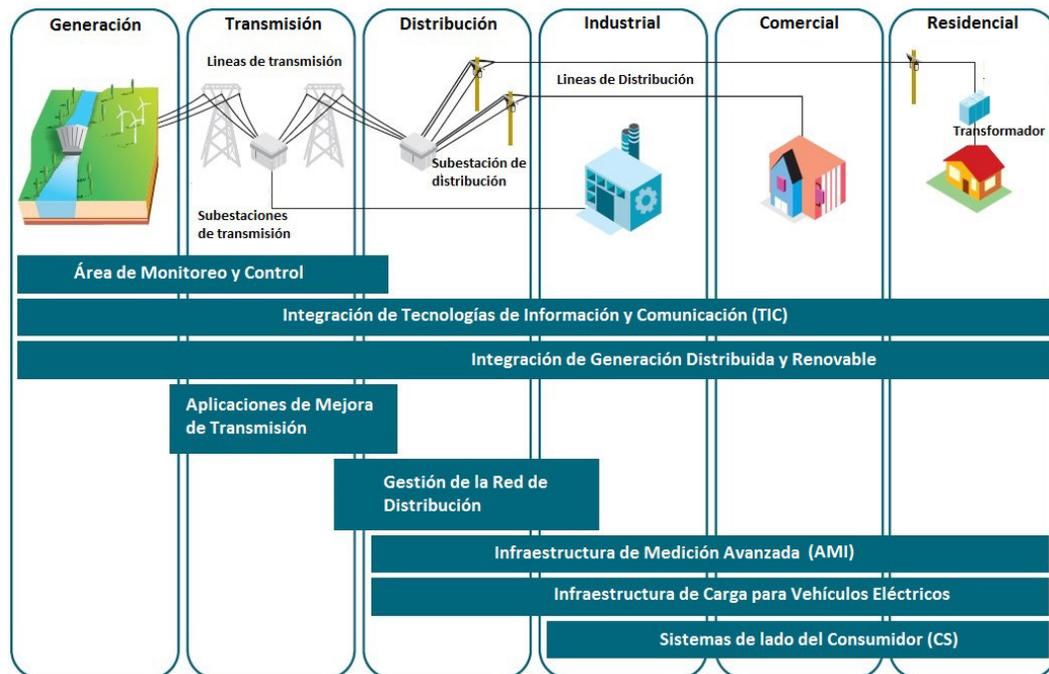


Figura 2.3: *Áreas de enfoque en las Smart-Grids [31].*

de las tecnologías mencionadas anteriormente ya se encuentran en operación en algunos países desarrollados y se consideran maduras tanto en su desarrollo como en su implementación, mientras que otras lo requieren en mayor medida. En este sentido, la creciente demanda requiere de una mejor planificación de todo el sistema eléctrico, que permita la integración de nuevas tecnologías tales como las Micro-Redes (MGs, por sus siglas en inglés), DGUs basadas en energías renovables, vehículos eléctricos (EV, por sus siglas en inglés), e infraestructuras de medición avanzada (AMI, por sus siglas en inglés) para una mejor gestión energética en términos de almacenamiento, generación y control de las redes modernas.

2.2.1.1. Micro-Red (MG)

Una MG puede definirse como una sección de red eléctrica capaz de desconectarse del sistema eléctrico principal y funcionar de manera autónoma [8]. Estas pueden proveer de energía a sus cargas durante un período de tiempo determinado, empleando fuentes de generación propias. Generalmente cuando se hace referencia a una MG se habla de sistemas a pequeña escala que gestionan la energía a diferentes niveles, ya sea comercial, industrial o residencial. Una MG convencional incluye [27]:

- Un sistema inteligente de conexión y desconexión del sistema eléctrico principal.

- Unidades de generación distribuidas (DGUs), incluyendo sistemas de almacenamiento distribuido (DSUs).
- Controladores para gestionar y optimizar los recursos de la MG.

El concepto de una MG representa de forma novedosa lo que se plantea al considerar el diseño y construcción de una Smart-Grid. Estas se centran en un diseño planificado de red eléctrica que busca satisfacer las diferentes necesidades energéticas, presentando características tales como [32]:

- Unidades de control centralizadas y descentralizadas.
- Interconexión de cargas con las DGUs y DSUs.
- Confiabilidad, calidad y seguridad en el suministro energético.

En la Fig. 2.4 se presenta de manera general un diagrama esquemático de una MG, donde esta se muestra como una porción del sistema de distribución eléctrico principal. El sistema presenta DGUs y DSUs con diferentes capacidades y características interconectados a través de un punto de conexión común (PCC, por sus siglas en inglés), con la finalidad de gestionar el suministro energético a los diferentes tipos de consumidores conectados a la MG.

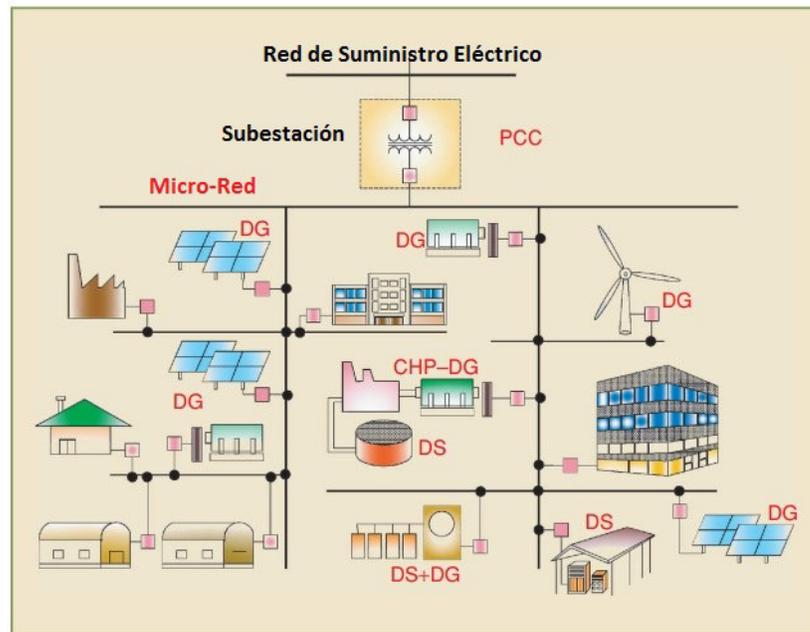


Figura 2.4: Estructura típica de una micro red [33]

Cuando una MG se encuentra operando sin una conexión a la red eléctrica principal, se hace referencia a una MG en modo aislado [34]. En este sentido, se busca que una red opere de manera aislada en los momentos en los que la calidad de la energía es baja y las interrupciones del sistema eléctrico son constantes, garantizando calidad y confiabilidad al momento de suministrar la energía eléctrica a las distintas cargas de dicha MG. Por otra parte, es casi obligatorio contar con unidades de almacenamiento si la MG se desea operar de manera aislada, evitando así, interrupciones energéticas en las cargas cuando el sistema principal experimenta una interrupción no planificada.

En una MG los usos de las DGUs pueden garantizar el balance de potencia y frecuencia aliviando la carga en las empresas del sector energético. Si en una MG se incluyen fuentes renovables, la variabilidad de estas puede ser gestionada por la MG evitando que los proveedores energéticos tengan que lidiar con la operatividad de estas [35]. Sin embargo, la operatividad de una MG depende de un control supervisor que decide la distribución y el uso de los recursos, con la finalidad de equilibrar la carga y la generación. Este controlador puede tener en cuenta perfiles de cargas previstos, costos de la energía, perfiles de viento, y disponibilidad solar pronosticada, considerando también factores tales como las necesidades de calefacción o refrigeración de los diferentes usuarios, emisiones contaminantes entre otros parámetros previstos [8].

La aceptabilidad del mercado de las MG y el aumento gradual de su profundidad de penetración han generado un interés significativo en la integración, el control y el funcionamiento óptimo de las MGs [31]. Inicialmente las MGs fueron percibidas como versiones reducidas de los sistemas de generación convencionales, e intuitivamente sus conceptos de control operativo se basaban en versiones reducidas y simplificadas de los conceptos de control de sistemas de potencia grandes. Sin embargo, en la actualidad un gran número de estudios se han centrado especialmente en proponer nuevos modelos de control para las MGs, garantizando un mejor aprovechamiento operativo de sus recursos y un mayor nivel de penetración en el sistema eléctrico actual.

2.2.1.2. Unidades de Generación Distribuidas (DGUs)

Las DGUs según [36] representan un nivel de generación energético cuyo participante es titular de uno o varios permisos para generar electricidad en centrales eléctricas, o bien, titular de un contrato de participante del mercado que representa en el mercado eléctrico mayorista a dichas centrales. Por otra parte, se encuentran las DGUs exentas de leyes energéticas, es decir, un propietario de una o varias centrales eléctricas que no requieren ni cuentan con algún tipo de permiso en términos de generación energética para cubrir con su propia demanda [36]. Los usos de las DGUs implican aspectos tales como eficiencia, fiabilidad, costo de inversión, predicción de la capacidad de generación energética, conexión segura a la red principal, gestión de la MG, almacenamiento, transporte de energía sin impacto medioambiental, algoritmos

de control, monitoreo, entre otras. Se presentan distintas alternativas para tratar de manera positiva mucho de estos aspectos, mostrando a las DGUs como una alternativa fiable dentro del campo de las Smart-Grids. Los especialistas dentro del campo energético expresan que las DGUs basadas en energías renovables son un tema importante al discutir el futuro energético mundial por dos razones principales [37]:

- Proporcionan energía a partir de fuentes inagotables.
- Producen menor emisión de elementos contaminantes que los sistemas basados en combustibles fósiles.

Ahora bien, actualmente las energías renovables más explotadas han sido las hidroeléctricas, fotovoltaicas y eólicas. A lo largo de las últimas décadas las energías renovables han experimentado un alto porcentaje de crecimiento a nivel mundial, representando un 13.5% del suministro total de energía en el mundo, y el 22% de la electricidad mundial [20]. Aunque, gran parte de este porcentaje actualmente se debe a la producción de energía hidroeléctrica, la producción de energía eólica (*Wind Turbine*, por sus siglas en inglés, WT) y solar (*Photovoltaic cell*, conocido por sus siglas en inglés, PV) han sido de gran atractivo para los investigadores del sector energético. En este sentido, según las estadísticas la energía eólica se está consolidando con un 1% de la producción mundial de energía, mientras que la energía fotovoltaica experimenta el mayor crecimiento, alcanzando más del 7% de la energía total mundial [23].

La energía fotovoltaica y la energía eólica producen potencia activa, y cuyo nivel de generación depende directamente de las condiciones ambientales, por ejemplo, la característica de corriente-voltaje ($i - v$) de un panel fotovoltaico es una función que se deriva de la irradiancia y la temperatura, mientras que la velocidad de par ($T - x$) característica de una turbina de viento es una función dependiente de la velocidad del viento y la humedad. Donde, para aprovechar al máximo la energía proporcionada por estos elementos, es necesario operar el sistema en su punto máximo de potencia, desarrollándose un gran número de investigaciones para garantizar el aporte óptimo de energía de estos sistemas [38]. En la Fig. 2.5 se muestran las curvas de puntos de operativos óptimos sobre una familia de curvas $i - v$ para un panel solar, y una familia de curvas $T - x$ para una turbina de viento, ambos bajo escenarios operativos hipotéticos dependientes de las condiciones ambientales.

El aumento de generación de energía renovable ha sido un atractivo esencial para lograr aumentar la participación de este tipo de tecnologías en los requerimientos energéticos mundiales. Se prevé será una transición técnicamente factible, pero requerirá de actualizaciones del sistema eléctrico actual y métodos para la integración adecuada de las distintas DGUs basadas en energías renovables. A continuación se presentan algunos retos que aún se deben enfrentar para la integración de las tecnologías basadas en energías renovables [39]:

- Variabilidad: Particularmente unidades generación basadas en energía eólica y solar dependen de un recurso siempre fluctuante (el viento y el sol, respectivamente). Dado que el suministro de electricidad debe satisfacer en todo momento la demanda eléctrica, se requieren esfuerzos para garantizar que las fuentes de generación estén siempre disponibles, suprimiendo esta variabilidad.
- Generación y Distribución: Las DGUs basadas en energías renovables representan sistemas de generación generalmente de uso privado o local, y un nuevo modelo comercial energético. Sin embargo, las empresas proveedoras de energía tradicionales desconfían aún en la integración de tales sistemas a la red, debido a las preocupaciones por fiabilidad, estabilidad, operación de la red, y fijación de precios por su aporte energético.
- Alto costo de inversión inicial: Las tecnologías basadas en energías renovables aún presentan un mayor costo de inversión inicial y menor ingreso por generación que las basadas en combustibles fósiles. Aunque las energías renovables pueden ser rentables a largo plazo, aún existen países en desarrollo que no cuentan con el capital suficiente para invertir en este tipo de energías.

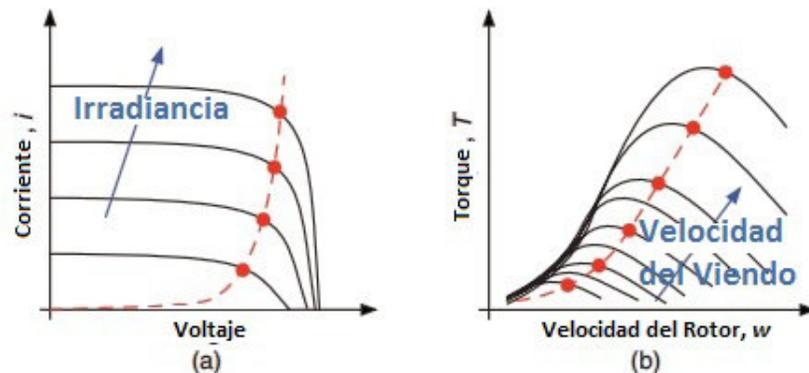


Figura 2.5: (a) Operatividad hipotética de un panel fotovoltaico, (b) operatividad hipotética de una turbina de viento [40].

Las Smart-Grids pueden hacer mucho para ayudar a enfrentar estos retos. En esencia una Smart Grid permite la integración de las energías renovables con una amplia gama de recursos eléctricos. La inclusión de generadores solares y eólicos y de EVs para el almacenamiento de energía excedente, podría cubrir con la demanda de determinado sector de consumo. Sin embargo, una gestión inteligente de estas podría permitir una mejor operatividad y aprovechamiento de la red en termino de generación, distribución y almacenamiento.

2.2.1.3. Unidades de Almacenamiento Distribuido (DSUs)

El almacenamiento de electricidad es extremadamente útil para agregar flexibilidad a las redes eléctricas, ya que ayuda a hacer frente a la variabilidad e imprevisibilidad de las energías renovables. El almacenamiento energético se puede dividir en almacenamiento masivo, que puede aportar grandes cantidades de energía en largos periodos de tiempo (MWh) y almacenamiento distribuido, que aporta menor cantidad de energía en periodos más cortos de tiempo (kW/min) [27]. Las contribuciones del almacenamiento distribuido han despertado gran interés, ya que mejorarían la capacidad de desplazar la utilidad de las energías renovables en los periodos del día más oportunos para emplearlas, evitando así grandes desperdicios energéticos. Aunque la agregación de estos sistemas de almacenamiento parece lejana debido a sus altos costos de implementación, sistemas tales como las baterías en EVs se muestran como una posible excepción ya que mejoran la utilidad que se le da a los elementos almacenadores convencionales. En este sentido, una infraestructura EV se establece como una DSU para la gestión inteligente de baterías.

Existen dos tipos de EVs que son de especial interés dentro de las tecnologías de Smart-Grids, y se clasifican en vehículos eléctricos híbridos (PHEV, por sus siglas en inglés) y vehículos completamente eléctricos (BEV, por sus siglas en inglés) [41]. Un PHEV se compone de un motor eléctrico que se carga mediante la conexión al sistema eléctrico o estación de carga, y un motor de combustión interna (ICE, por sus siglas en inglés) que opera únicamente cuando no se cuenta con una carga suficiente para la operatividad del vehículo. Por otra parte, un BEV es un vehículo completamente eléctrico donde su funcionalidad depende exclusivamente del estado de su batería.

Aquí, las SmartGrids desempeñan un papel importante no solo en mantener la fiabilidad del sistema, sino que también buscan establecer mecanismos de DR para la carga/descarga de los EVs durante los intervalos de baja/alta demanda, evitando la carga durante los periodos de alto/bajo consumo [42]. La mayoría de las propuestas para el uso de los EVs como unidades de almacenamiento agregan muchas de estas unidades para un almacenamiento masivo del lado del operador de la red [43],[44]. Ahora bien, dado que las baterías aún representan un punto débil en los EVs, es difícil obtener beneficios desde el punto de vista económico debido al rápido desgaste cuando las baterías se someten a ciclos de carga/descarga profundos. Sin embargo, en investigaciones recientes indican que operar bajo ciclos distribuidos de carga/descarga de la batería causa menores daños que los ciclos de carga/descarga profundos, proporcionando mejores beneficios económicos para los usuarios de estos sistemas [45].

2.2.1.4. Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)

AMI hace referencia a un sistema de medición inteligente que consta de equipos de comunicación y procesamiento de datos necesarios para recoger la información suministrada por los medidores inteligentes y entregarlos a los operadores de la red. Los medidores inteligentes de electricidad difieren de los medidores eléctricos convencionales por tres razones fundamentales [31]:

- Miden el uso energético con resoluciones menores a una hora.
- Informan en tiempo real a las empresas reguladoras de electricidad acerca de la utilidad energética.
- Permiten una comunicación bidireccional.

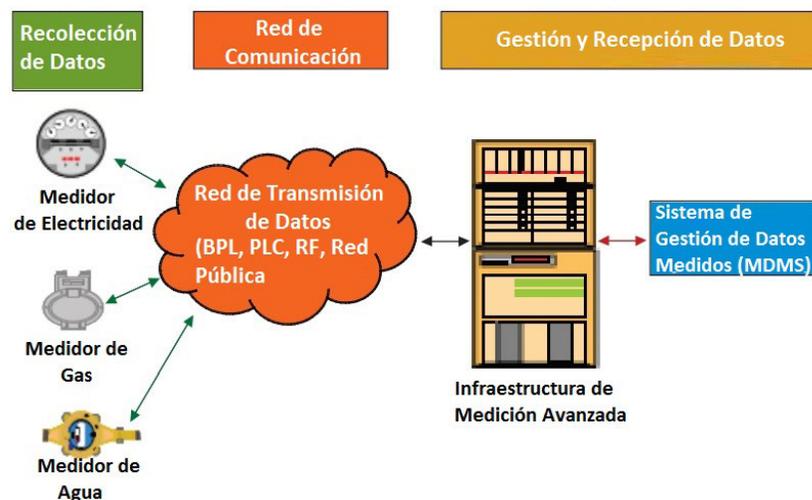


Figura 2.6: Esquema operativo de un AMI [46].

La Fig 2.6 muestra los bloques de operación que conforman un AMI, donde el cliente está equipado con medidores avanzados que incluyen contadores de electricidad e incluso de gas y agua. Estos medidores tienen la capacidad de transmitir los datos recopilados a través de sistemas de banda ancha sobre la red eléctrica (BPL, por sus siglas en inglés), comunicación por líneas eléctricas (PLC, por sus siglas en inglés), redes fijas de radio frecuencia (RF, por sus siglas en inglés) o redes públicas tales como Wi-Fi, modem, celular y/o satélite. Los datos del medidor son recibidos por el sistema central AMI y enviados al sistema de gestión de datos del medidor (MDMS, por sus siglas en inglés) que permite el almacenamiento y análisis de los datos para presentarlos de manera útil a la empresa reguladora de energía. Ya procesados y analizados estos datos, las empresas reguladoras de electricidad también pueden proporcionar a los usuarios

información tal como costo de la energía, conexión o desconexión de cargas e información de la DR.

La infraestructura que presenta AMI puede permitir la integración de unidades de generación alternativas tales como las energías renovables, gracias a que [27]:

- Permite medir los recursos disponibles en las DGUs, incluyendo servicios para compensación, control y planificación de estas.
- Sirve como infraestructura de comunicaciones para la integración de recursos dentro de los esquemas de automatización distribuida (DA, por sus siglas en inglés).
- Habilita esquemas avanzados de precios de la electricidad, mejorando el uso de las DGUs basadas en energías renovables para aportar beneficios económicos a los usuarios.
- Sirve como un enlace de comunicación entre la DR y las DGUs basadas en energías renovables.

Como todos los elementos que componen a una Smart-Grid, garantizar la interoperabilidad de los medidores inteligentes con los sistemas existentes representa un gran reto actualmente. Debido a que aún no se han estandarizado las pruebas de interoperabilidad, las empresas del sector energético deben esperar ejecutar sus propias pruebas para asegurar que los nuevos productos se integrarán de manera satisfactoria al sistema eléctrico actual. Por otra parte, las tecnologías que aprovechan el AMI están cambiando rápidamente. Sin embargo, las empresas del sector energético deben evaluar cuidadosamente la flexibilidad y la capacidad de actualización de los medidores inteligentes antes de su instalación [47].

2.3. Sistema de Gestión Energética (EMS)

Los sistemas operados a través de microprocesadores y computadores pueden emplearse para el monitoreo y control en línea de los sistemas energéticos modernos a grandes y pequeñas escalas, como la generación, transmisión y distribución, buscando superar las complejidades e inconvenientes presentes en los sistemas de instrumentación convencionales. Estos sistemas constituirán una parte importante dentro de las Smartgrids. Por su parte, las Smart-Grids deben complementarse con dispositivos inteligentes programables del lado de los consumidores para redistribuir eficientemente la demanda, tratando de proporcionar beneficios tanto para el usuario de la red como para la empresa proveedora de energía. En este orden de ideas, los sistemas de

gestión energética (EMS, por sus siglas en inglés) son herramientas vitales de control y supervisión utilizadas para operar de manera eficiente las Smartgrids [48],[49].

2.3.1. Funcionabilidad de un EMS

El concepto de EMS tiene alrededor de 50 años de haberse presentado en [50], se ha utilizado ampliamente en centros de control eléctrico (EPCC, por sus siglas en inglés) en todo el mundo, jugando un rol importante en la prevención de contingencias y cortes energéticos no planificados. En [51] se describe que los EMS representan el núcleo del EPCC ya que gestiona y controla el sistema de energía de una manera segura y económica. Se introduce un EMS de nueva generación N-EMS empleado como un sistema de prevención de cortes energéticos no previstos.

En [52] definen un EMS como modelo de optimización aplicado a una MG para la gestión de cada unidad de generación y almacenamiento en cada hora del día siguiente, con el objetivo de:

- Minimizar costos por uso de combustible.
- Minimizar emisiones de gases de efecto invernadero.
- Mejorar eficientemente el uso de la energía.
- Maximizar la utilidad de la MG en diferentes escenarios operativos.

Estos objetivos deben cumplirse bajo restricciones operativas, precio de la energía, capacidad máxima pronosticada para las DGUs instaladas en la MG y energía demandada por las cargas, mostrando finalmente la programación óptima del estado de la MG para el siguiente día. En este sentido, y con el objetivo de optimizar la utilidad de una MG aislada, en [53] se propone un EMS para minimizar el uso de combustibles fósiles en la generación energética. Un EMS representa un sistema que crea la oportunidad de manipular la energía de forma inteligente en una MG. Se demuestra su funcionabilidad mediante modelos, simulaciones y validaciones experimentales de los siguientes escenarios:

- Control de picos de potencia mediante la implementación de sistemas de almacenamiento de energía durante los periodos de alta demanda energética.
- MG en modo aislado por interrupciones de potencia o por elección.
- Control de picos de potencia debido a los transitorios.

Describen además que las EMS pueden ser de gran utilidad cuando los usuarios pagan diferentes tarifas por la potencia suministrada a diferentes horas del día. Es decir, los EMS pueden gestionar la energía almacenada y la energía extraída del sistema eléctrico o de las DGUs para reducir el consumo cuando los costos de la energía son elevados.

2.3.2. Sistema de Gestión Energético de nivel Residencial (HEMS)

Se han propuesto EMS para distintos niveles de consumidores que van desde niveles industriales y comerciales hasta niveles residenciales. Por su parte, aún cuando la demanda energética sigue exhibiendo un incremento en todos los sectores, tal como lo explican en [11] y [16], las tendencias apuntan al sector residencial como el sector que presenta el mayor incremento en la demanda [54], por tal motivo, numerosos estudios se han enfocado en tratar la problemática en la demanda del lado residencial. Un concepto se deriva del EMS y se plantea como una metodología para la gestión energética a un nivel residencial, esta se conoce como HEMS (*Home Energy Management*, por sus siglas en inglés, HEMS) [7]. En este sentido, trabajos tales como [16] y [55] muestran los beneficios de implementar un HEMS. Estos presentan algunas metodologías para la gestión óptima de algunos electrodomésticos de alto consumo interconectados a la red eléctrica doméstica, administrando su uso para garantizar un consumo más consciente y eficiente y un mayor ahorro económico sin comprometer el nivel de confort de los usuarios finales.

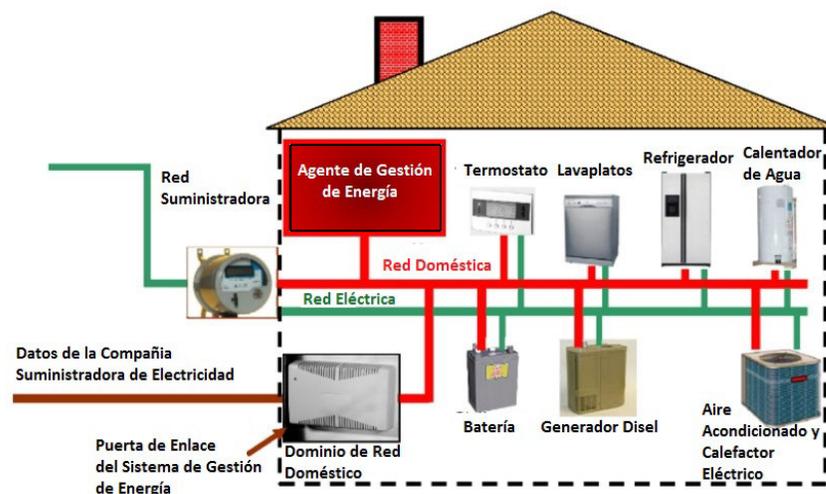


Figura 2.7: Esquema operativo de un HEMS [56].

En la Fig. 2.7, se muestra un esquema operativo de un HEMS que es capaz de gestionar distintos elementos a un nivel residencial, manipulando pequeñas unidades de generación y almacenamiento para abastecer las distintas cargas domésticas controlables, eliminando en gran parte la dependencia del sistema eléctrico principal, logrando a su vez beneficios económicos al considerar aspectos tales como tarifas energéticas, condiciones ambientales y emisiones de elementos contaminantes. Las HEMS al igual que las EMS operan para monitorear, controlar y analizar la energía, pero esta vez enfocado al hogar. Se incluyen elementos de DSM, DR, servicios de administración de energía personal, visualización, seguridad y análisis de los datos de consumo.

2.4. Gestión del Lado de la Demanda (DSM)

De acuerdo con [54], el sistema DSM que se aborda en el presente trabajo consiste en tres secciones: control central, proveedor de energía y clientes. Por su parte, la Fig. 2.8 muestra de manera general la gestión y el despacho de energía para los distintos sectores de consumo. La DSM que ha sido tratada tradicionalmente se presenta como una alternativa para reducir la demanda excesiva de electricidad, tal como se describe en [57]. En este sentido, al reducir la carga global presente en la red eléctrica por medio de la DSM se pueden presentar varios escenarios beneficiosos, incluyendo la mitigación de emergencias dentro del sistema eléctrico, reducción del número de apagones, y aumento de la confiabilidad del sistema [58]. Otros posibles beneficios también pueden incluir la disminución de la dependencia de combustibles fósiles, la reducción de los precios de la energía y la reducción de emisiones contaminantes. Finalmente, la DSM desempeña un papel importante en las redes actuales, ya que buscan reducir los costos producidos por generación, transmisión y distribución de la energía. Por lo tanto, DSM aplicado a los sistemas de electricidad proporciona importantes beneficios económicos, de fiabilidad y medioambientales [59].

La motivación detrás de la utilización de DSM puede presentar variantes para las diversas áreas implicadas. Así, si se hace referencia al sector industrial, la reducción o cambio de la demanda de energía de un cliente podría significar evitar o retrasar la construcción de centros de generación adicional [60]. En algunas situaciones, esto evitaría o retrasaría el incremento de los precios de la energía paulatinamente, que de otro modo se impondrían a los clientes para el financiamiento de nuevas inversiones con el objetivo de aumentar la capacidad del sistema de generación que los surte. En este sentido, a los clientes que empiezan a abordar este concepto, la DSM ofrece la oportunidad de reducir su factura a través de medidas de eficiencia energética [61]. Donde, en el caso de los clientes industriales, esto se traduciría en menores costes de producción y en un producto más competitivo, mientras que para los clientes de nivel residencial, significaría un ahorro económico que podría ser utilizado para diferentes

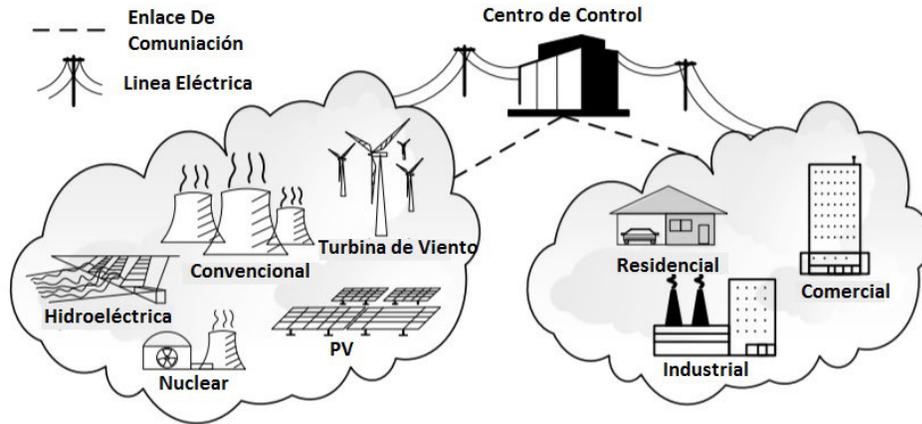


Figura 2.8: Sistema DSM [54].

finés [62–64].

Varias razones son propuestas para promover y llevar a cabo DSM ya sea a nivel industrial como a nivel residencial. Por ejemplo, la DSM puede estar dirigida para cumplir los siguientes objetivos [65]:

- Reducción de costos, introduciendo la DR y la eficiencia energética en el contexto de la planificación integrada de los recursos para cubrir la demanda, satisfaciendo las exigencias energéticas.
- Mejoramiento social y ambiental, a través del manejo de eficiencia energética y DR, pueden obtenerse resultados positivos medioambientales y/o sociales mediante el uso supervisado del sistema eléctrico, lo que conduce a una reducción considerable de emisiones de elementos contaminantes.
- Confiabilidad del sistema eléctrico, donde a través de la implementación de programas de DSM se busca mitigar posibles problemas en la red eléctrica mediante la reducción de la demanda, permitiendo mantener la fiabilidad del sistema a corto y largo plazo, evitando expandir la red para cubrir con la demanda total.
- Respuestas a corto plazo a las condiciones del mercado de la electricidad, especialmente mediante la reducción de la carga durante los periodos en el que el costo energético es alto, causado por la reducción de la capacidad de generación de la red.

Ahora bien, los proveedores pueden influir en la redistribución de la demanda y en el tiempo de uso de la energía a través de la gestión de la carga o programas de

DR. En este sentido, la gestión de cualquier tipo de carga permitirá modificar la curva de la demanda sin perjudicar la utilidad del servicio eléctrico del lado del consumidor. Dentro de los tipos de técnicas para la gestión de cargas se mencionan las técnicas de control y nivelación de carga [66].

2.4.1. Control y Nivelación de Carga

En este tipo de gestiones como se presenta en [67] y [68], se maneja un concepto de control de estado de la carga, donde cargas (por ejemplo, calefacción, refrigeración, ventilación e iluminación) pueden ser administradas para su encendido o apagado remoto por medio de empresas de servicios públicos tal como se menciona en [59]. Por otra parte, los consumidores pueden tener unidades de generación y almacenamiento para un respaldo energético, y establecer convenios con el proveedor eléctrico a cambio de tarifas especiales.

Es importante mencionar que, cuando el elevado crecimiento de la demanda de electricidad no se corresponde con el crecimiento de los centros de generación, no se puede evitar que se presente un déficit energético. Los déficits energéticos que se presentan requieren una mejor estrategia de gestión y operación de los sistemas de energía eléctrica, teniendo en cuenta la seguridad, confiabilidad y el servicio al cliente. Es por esto que en [69] se discute brevemente el impacto de los apagones en la economía y en las comunidades afectadas en determinada región; se establece una propuesta de DSM como medida para superar el déficit a corto plazo de la región afectada. Por otra parte, en [67] se propone un algoritmo que busca minimizar el costo del proveedor de electricidad y la insatisfacción del usuario a nivel residencial. Aquí, la empresa proveedora de energía y los usuarios finales intercambian información a través de una AMI de comunicación bidireccional, optimizando la generación de energía y el consumo energético.

La energía eléctrica no se puede almacenar a bajo precio o en grandes cantidades. Por lo tanto, la oferta y la demanda deben equilibrarse simultáneamente. No obstante, la demanda energética se incrementa progresivamente, y de la mano, el costo y el impacto ambiental al construir nuevas plantas generadoras de energía, buscando cubrir con la creciente demanda. Ahora bien, lo que se busca principalmente en este tipo de programas de DSM para el control y nivelación de cargas es la disminución o distribución de la energía exigida durante los picos de demanda energética, tal como se presenta en [68], donde se muestran algunas estrategias como las mostradas en la Fig. 2.9, y que a continuación se mencionan los tres principales:

- Reducción de picos(peak clipping): Se plantea un recorte o decremento de los picos de alta demanda, reduciendo las cargas durante las horas pico. Esta gestión

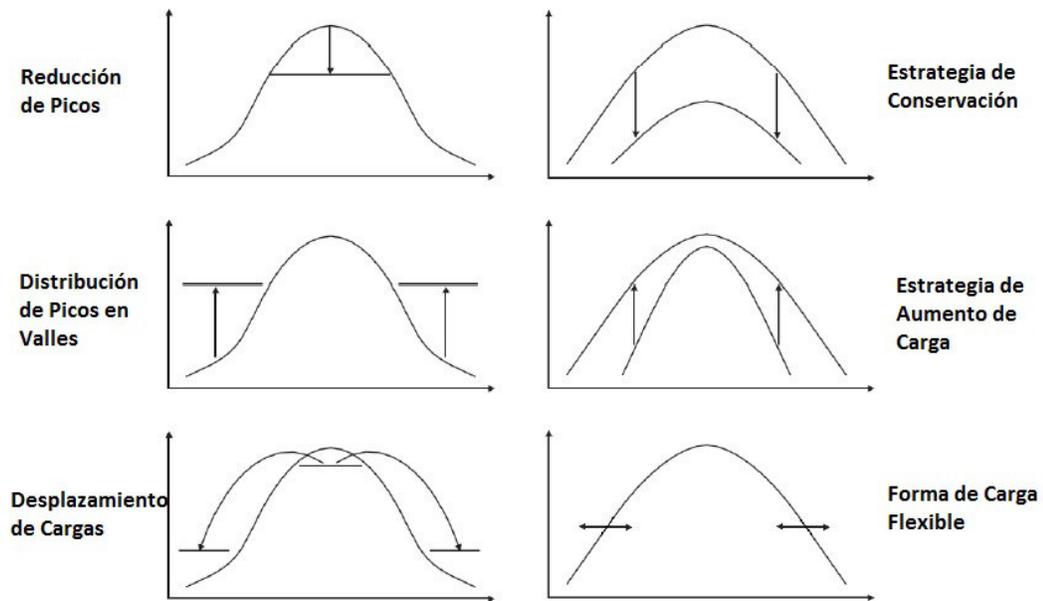


Figura 2.9: *Objetivos y estrategias DSM [68].*

de la carga tiene poco efecto en la demanda energética, pero de igual forma se centra en la reducción de la demanda máxima.

- **Distribución del pico en valles (valley filling):** Se denominan valles a los periodos en el que la demanda energética se considera baja, esta estrategia consiste en llenar los valles mediante la redistribución de la energía consumida en los picos de alta demanda, lográndolo a través del almacenamiento o gestión de la carga.
- **Desplazamiento de cargas (Load Shifting):** En esta estrategia las cargas son desplazadas desde el pico hasta los valles logrando el recorte de pico y el llenado de los valles. En [70], [71], se muestran aplicaciones para la gestión energética aplicando el Load Shifting para la redistribución de cargas evadiendo picos de alto consumo, optimizando la eficiencia energética.

2.4.2. Componentes del DSM

En el esquema de la Fig. 2.10 se presenta un esquema de lo que se incluye dentro de los programas de DSM, aquí se muestran dos principales programas de DSM, la Eficiencia Energética (EE, por sus siglas en inglés) y la DR. Donde EE se establece como un programa de concientización y planificación energética a largo plazo para reducir de manera rápida y rentable el consumo y las emisiones de CO₂. Por otra parte, la DR presentan algunos programas para la gestión de la energía, clasificándolos

como despachables y no despachables. Dentro de estos elementos de DR, se manejan algunos programas tanto de tarifas como de gestión directa de cargas, y estos se pueden implementar ya sea a nivel industrial, comercial y residencial. De esta manera, los programas DR ofrecen la posibilidad de reducir la demanda del lado de los usuarios adscritos a dichos programas. Por otra parte, aunque los programas de DR no están centrados directamente en la eficiencia energética como lo son los programas EE, estos programas de DR pueden servir como complemento principal para reforzar la gestión de la energía, repercutiendo directamente en el ahorro económico, reducción de los picos de demanda, la volatilidad de los precios en los distintos mercados energéticos, y la contribución en la reducción de emisiones contaminantes [72].

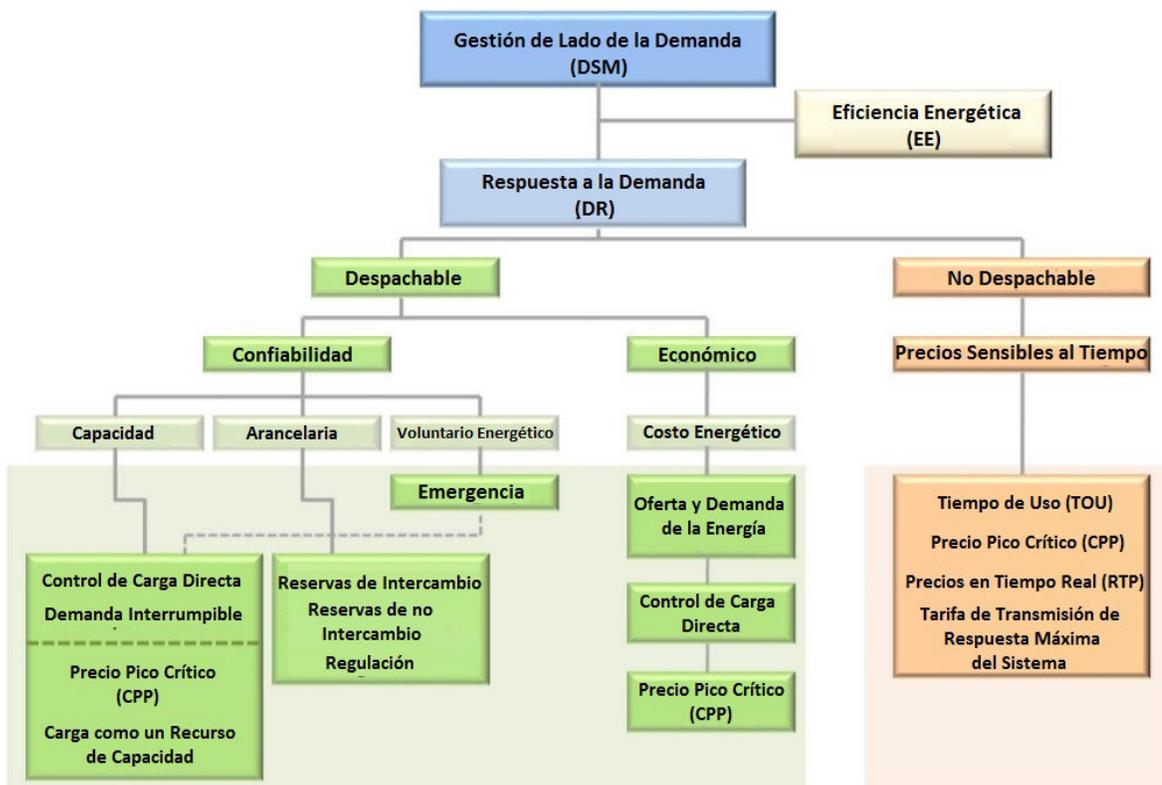


Figura 2.10: Esquema de los componentes del DSM [73].

2.5. Respuesta a la Demanda (DR)

Los programas de DR ofrecen a los consumidores de electricidad la oportunidad de cambiar intencionalmente el estado de sus cargas, ya sea en respuesta a señales de precios de la energía o a cambio de un incentivo económico [74]. A través

de estos cambios en las cargas, los programas de DR ofrecen la posibilidad de reducir las exigencias sobre la transmisión y/o la red de distribución [75], permitiendo a los usuarios tener mayor utilidad de sus cargas solo en los momentos en los que existe mayor disponibilidad energética. Por otra parte, las negociaciones sobre los proyectos de DR con los clientes promete un aumento sustancial en la eficiencia, la estabilidad y la confiabilidad del sector eléctrico. Algunos de los beneficios que se pueden obtener a través de la implementación de los programas DR se presentan en [76] y [77] y se describen a continuación:

- Reducción del consumo total de energía, obteniendo beneficios tanto para el consumidor como para las compañías suministradoras.
- Reducción de la generación total de energía necesaria, donde por medio de la implementación de esquemas de DR, se reduce la construcción de más centrales de generación eléctrica.
- Cambio de la demanda, siguiendo la disponibilidad energética, especialmente en regiones con penetración de fuentes de energías renovables.
- Mitigación de sobrecargas en los sistemas de distribución.
- Beneficios financieros y medio ambientales, entre otros.

Las exigencias energéticas actuales requieren que las redes eléctricas se planifiquen y gestionen con años de antelación, asegurando el funcionamiento confiable en tiempo real a pesar de las incertidumbres que rodean las futuras demandas, fuentes de combustible, disponibilidad de activos y condiciones de red. Trabajando en un mercado competitivo de energía a granel, las entidades de servicio de carga (empresas eléctricas integradas o proveedores minoristas de electricidad) compran de un 60 % a 95 % de su electricidad por adelantado [78], con la expectativa de que podrán generar en tiempo real en el mercado de un día en adelante, y así poder satisfacer las demandas cambiantes del sistema.

Estos desafíos e incertidumbres son los que hacen que la DR tome importancia, ofreciendo flexibilidad aún bajo costo. Operadores de Redes (ISO, por sus siglas en inglés), Organizaciones Regionales de Transmisión (RTO, por sus siglas en inglés) o empresas de servicios públicos y otras entidades, pueden utilizar los programas de DR para reducir o cambiar la carga mediante la ejecución de eventos de DR en lugar de, tradicionalmente, construir más centros de generación [79] y [80]; y aunque se requiere tiempo para establecer y reclutar clientes para un programa de DR, la fijación de precios bien estructuradas y la DR basada en incentivos económicos pueden producir ahorros significativos a corto y largo plazo [78].

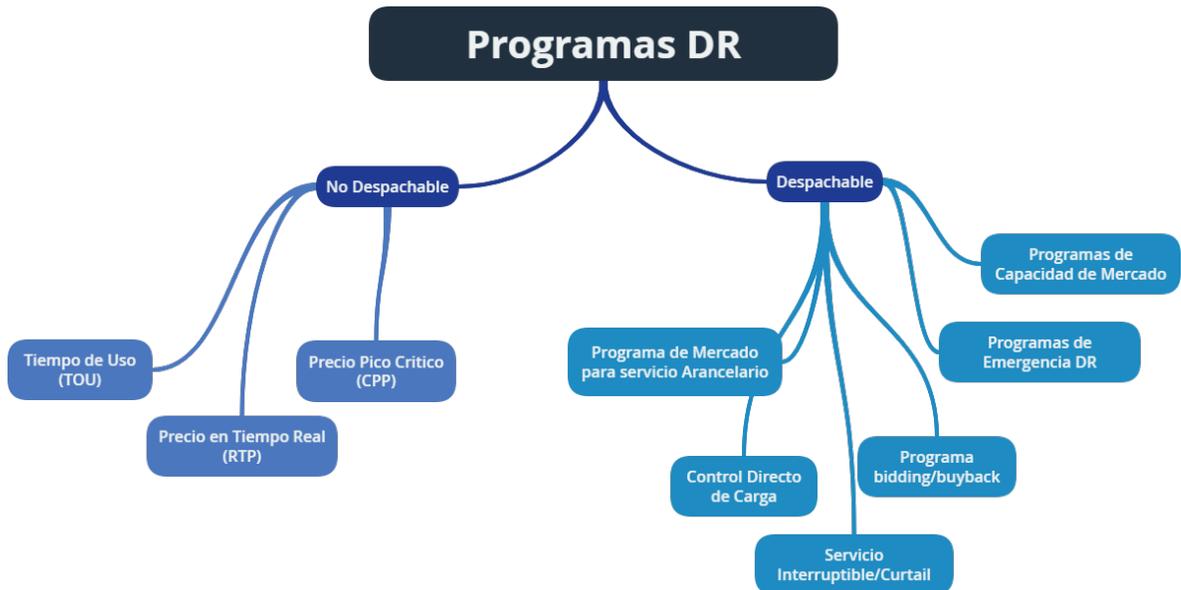


Figura 2.11: Clasificación de los programas DR.

En el esquema de la Fig. 2.11 se plantea un esquema que muestra algunos de los programas de DR empleados para la reducción de la carga en los intervalos de máxima demanda, estos se clasifican dentro de programas basados en eventos (despachables) y no basados en eventos (no despachables). Un programa de DR basado en eventos hace referencia a que las fuentes de electricidad pueden despachar solo si hay una petición por parte de los operadores de la red o de la compañía suministradora [68], para ello se indican técnicas como el control directo de carga entre otras que serán mencionadas más adelante; por otra parte cuando se habla de un programa no basado en eventos, se hace referencia a un programa que no tiene un control directo en el encendido o apagado de las cargas, por lo tanto a los usuarios adscritos a este tipo de programas se les ofrecen servicios basados en tarifas, como pueden ser tarifas en tiempo real como el (RTP, por sus siglas en inglés) o por bloques de precios como el (TOU, por sus siglas en inglés), estas se detallarán más adelante.

Las técnicas para cuantificar los impactos de los programas DR pueden variar dependiendo del objetivo. En la mayoría de los casos los ISO/RTO establecen los requisitos de medición y verificación [73]. Algunas de las medidas más comunes incluyen: cuanto cambio de energía ocurrió durante el período máximo; la reducción de la demanda durante las horas pico; o la disminución de la demanda durante un período preestablecido. Dependiendo de la magnitud de los datos reunidos para el proceso de medición y verificación, puede ser necesario escalar o unificar los datos para comparar la precisión de la forma de la carga del participante versus la forma de la carga no participante.

2.5.1. DR no Basada en Eventos (No Despachable)

Esta clasificación se les da a los programas de DR que varían en función del tiempo. En estas opciones tarifarias el precio de la electricidad fluctúa de acuerdo a variaciones en los costos subyacentes a la generación y disponibilidad energética. Las tarifas que varían en función del tiempo pueden ofrecerse como una alternativa opcional a una tarifa regular fija. Los clientes de estas tarifas pueden reducir sus facturas de electricidad si responden ajustando el tiempo de uso de su electricidad, reorientando sus consumos en los momentos de precios bajos y/o evitar el consumo energético excesivo cuando los precios son altos [81]. Aquí, la respuesta del cliente suele ser impulsada por un proceso interno de tomas de decisiones económicas y cualquier modificación de la carga totalmente voluntaria. Este tipo de programas DR se consideran no despachables debido a que no son considerados como fiables o verificables durante los periodos de demanda pico del sistema [77]. Programas como el TOU, el RTP y Precio Pico Crítico (CPP), son ejemplos de programas no basados en eventos, se describen en [73] y se explican a continuación:

- TOU: Consta de una tarifa con diferentes precios unitarios para el uso durante diferentes bloques horarios, generalmente definidos para un periodo de 24 horas. Las tarifas TOU reflejan el costo promedio de entrega y generación de energía durante esos períodos de tiempo. Las tasas de TOU varían a menudo según la hora del día y periodo estacional, y son típicamente predeterminadas durante un período de varios meses o años.
- RTP: Es una tarifa en la cual el precio de la electricidad fluctúa típicamente cada hora en que se registran cambios en el precio de la electricidad. Los precios de RTP son típicamente conocidos por los clientes con un día de anticipación o tiempo en adelante. Algunos trabajos tales como [82] y [83] muestran la utilidad de emplear RTP a nivel residencial, reduciendo costos en las facturas de los usuarios a través de herramientas de Scheduling (reprogramación de consumo) basadas en RTP, permitiendo la interacción del consumidor sin comprometer su confort.
- CPP: Las tarifas CPP incluyen una tasa alta preestablecida en un periodo designado por parte de la empresa como un periodo crítico de pico. Los eventos del CPP pueden ser desencadenados por contingencias del sistema a altos precios que enfrenta la empresa para obtener energía en el mercado mayorista, dependiendo del diseño del programa. Las tarifas de CPP pueden ser establecidas a través de un TOU o una tarifa de tiempo invariante y son empleados por un plazo relativamente corto por un número limitado de días y/u horas por año. Los clientes CPP normalmente reciben un descuento de precios durante los periodos que están fuera del rango CPP. Por otra parte, las tasas de CPP aún no son comunes, pero algunos sistemas pilotos han sido probado para algunas empresas de mediano y gran tamaño, aunque de igual manera se han realizado investigaciones

extrapolando tal concepto CPP a niveles residenciales tal como se muestra en [84–86].

2.5.2. DR Basada en Eventos (Despachable)

Los programas de DR basados en incentivos, representan arreglos contractuales diseñados por responsables de políticas energéticas, operadores de redes, entidades de servicios de carga tales como empresas de servicios públicos y proveedores minoristas de electricidad, buscando obtener así reducciones de demanda de clientes en momentos críticos denominados “eventos” [87]. Los incentivos pueden ser reflejados en la factura en forma de créditos o pagos por reducción de cargas. La inscripción y la respuesta del cliente es voluntaria, aunque en algunos programas de DR se imponen sanciones a los clientes que se inscriben pero no responden o incumplen con los compromisos cuando se declaran los eventos [88]. Los programas de DR, típicamente especifican métodos para establecer el nivel básico de consumo de energía de los clientes frente al cual se miden sus reducciones de demanda energética.

Ciertos programas de DR despachables pueden disminuir rápidamente la forma de la carga del sistema. Estos programas son especialmente eficientes cuando existen interrupciones forzadas, por fallas en el sistema, o por condiciones medio ambientales adversas, presentándose en la red eléctrica déficits energéticos que no pueden cubrir la energía demandada. Algunos de estos programas se explican a continuación [89]:

- Control Directo de la Carga (Direct Load Control): Consta de un programa DR donde se pueden encender o apagar determinados equipos eléctricos (por ejemplo, aires acondicionados, calefactores, calentadores de agua, etc.) a corto plazo, como plan de contingencia para reducir la demanda eléctrica. Los clientes a menudo reciben un pago de participación, generalmente como descuento en su factura de electricidad. Algunos de estos programas de DR ofrecen opciones de anular o rechazar la acción de control. Los programas de control de carga directa se ofrecen principalmente a clientes residenciales o comercios pequeños.
- Servicio de Conexión y Desconexión de Cargas (Interruptible/Curtailable (I/C) Service): Proporcionan un beneficio económico o un crédito en la factura del cliente por acordar reducir la carga, típicamente a un Nivel de Servicio fijo Preestablecido (*Fixed Service Level*, conocido por sus siglas en inglés, FSL), durante contingencias del sistema. Por otra parte, los clientes que no cumplen con la reducción de cargas durante estos eventos de contingencia suelen ser penalizados con precios muy altos de la electricidad durante dichos eventos.
- Programas de Oferta/Demanda (Demand Bidding/Buyback Programs): Se consideran programas DR de este tipo aquellos programas que se preocupan

por alentar a grandes clientes licitantes de un mercado energético mayorista a reducir sus niveles de carga, o a motivar a los clientes a identificar cuanta carga ellos estarían dispuestos a reducir a un precio considerable. Ya una vez que el cliente acepta el convenio puede enfrentar una penalización al incumplir con dicho acuerdo.

- Programas de mercadeo de servicios conexos (Ancillary Services Market Programs): Estos programas permiten a los clientes ofrecer reducciones de sus cargas en los mercados ISO/RTO como reservas operativas. Si la suspensión de sus cargas es requerida, son llamados por los programas ISO/RTO, y una vez aceptadas sus ofertas, se les retribuye un incentivo económico por comprometerse a estar en espera.

2.5.3. Integración de los programas de DR

La gestión de la energía y el balance de potencia deben mantenerse en diferentes escalas de tiempo, tanto a largo plazo (anualmente), mediano plazo (mensualmente) o a corto plazo (día, hora o minuto), para una mejor integración de cada uno de los programas de DR [90]. Los programas de DR de energía se desarrollan principalmente para la gestión de energía a mediano plazo (programas no basados en eventos) y a corto plazo (programas basados en eventos). La gestión de la energía a corto plazo se ve especialmente afectada por la red debido a la disponibilidad energética al día siguiente y a la operación en tiempo real. En la Fig. 2.12 se presenta un modelo de generación de energía y programación de la operación en diferentes escalas de tiempo en una red eléctrica, mostrando la distribución de los programas de DR, basados tanto en incentivos económicos (despachables), como en precio de la energía (no despachables).

Por otra parte, en [92] indican que en los mercados competitivos de electricidad existe una profunda preocupación por el nivel de eficiencia, en consecuencia, los programas de DR cobran una considerable importancia para su posible integración. En este orden de ideas, en [93] se resume la contribución existente de los recursos de DR en los mercados de energía eléctrica de los Estados Unidos. Donde se muestra que durante el 2008 los clientes inscritos en los programas existentes de venta al por mayor y venta al por menor de DR fueron capaces de proporcionar 38.000 MW de potenciales reducciones de carga máxima en Estados Unidos. En el mismo sentido, en [94] se propone una estrategia de integración de DR en el contexto de una red de distribución inteligente. En la estrategia de DR propuesta, a los consumidores se les presenta la opción de determinar qué carga controlar y cuando, y se introducen índices de confort del consumidor para medir el impacto que se tiene al integrar los programas de respuesta a la demanda en el estilo de vida de los consumidores.

La integración de los programas de DR pueden presentar beneficios, y estos se

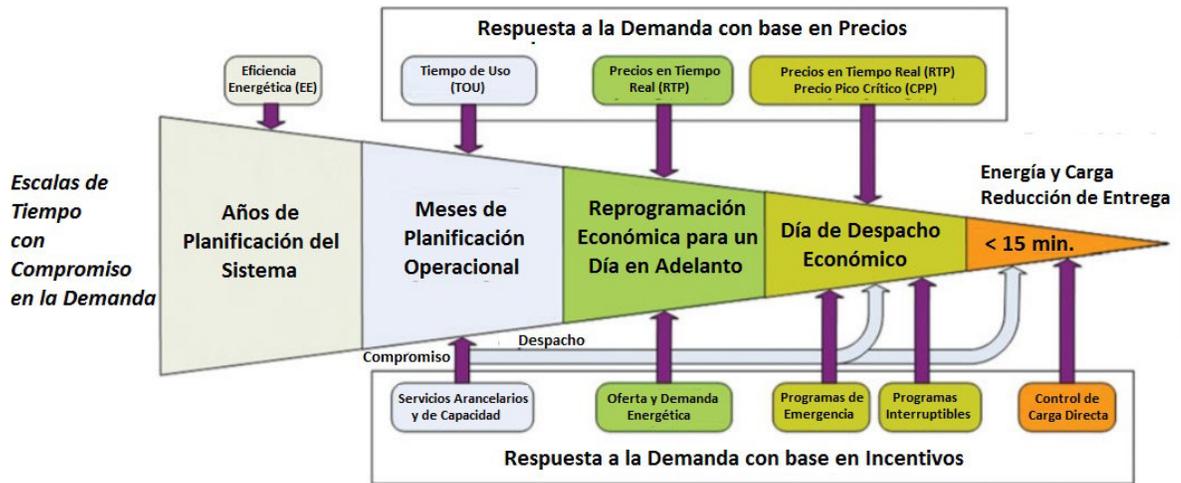


Figura 2.12: Planificación de generación en programas de DR tomada de [91]

pueden clasificar en tres categorías funcionales: directos, colaterales y otros [78] como se muestra en la Tabla 2.1. Donde los beneficios directos recaen en los consumidores que emprenden acciones de DR, y los beneficios colaterales y otros son aprovechados por algunos o por todos los grupos de consumidores de electricidad. Los beneficios directos y colaterales pueden cuantificarse en términos monetarios. Mientras que los otros beneficios son más difíciles de cuantificar o monetizar, ya que se representa en términos de robustez del mercado eléctrico minorista, mejoramiento de las opciones en los mercados energéticos mayoristas e incluso impacto medio ambiental.

La Gestión de la Demanda de energía eléctrica es un tema de amplio tratamiento a nivel internacional, no solo como un tópico en el paradigma de las Smartgrids, sino también en el marco de la discusión acerca de la eficiencia y sustentabilidad energética [93]. Los programas de Gestión de la Demanda son de reciente aplicación, y el interés en la implementación principalmente de los países industrializados, puede atribuirse a una mezcla de situaciones actuales como son las crisis energéticas, los apagones, los altos precios de los combustibles, los nuevos retos ambientales, el creciente interés por la eficiencia y la sustentabilidad energética. Ahora bien, en el caso de los países en vía de desarrollo como es el caso de México, existe una gran oportunidad de incorporar dichos conceptos en el planteamiento energético y los planes de crecimiento económico [95]. En este sentido, orientar los conceptos para desarrollar una herramienta que permita la gestión de la energía a un nivel residencial, resulta interesante debido a los cambios en las nuevas perspectivas energéticas que se están empezando a proponer en México, por lo que todos los conceptos antes presentados pueden enfocarse y sintetizarse en un sistema que permita gestionar las cargas y reducir la demanda en las horas pico de consumo, atribuyendo mejores beneficios a los usuarios.

Tabla 2.1: *Beneficios de los programas de DR [78]*

Tipo de Beneficio	Destinatarios(s)	Beneficio		Descripción/Fuente
Beneficios Directos	Clientes que realizan acciones de DR.	Beneficios financieros		Ahorro en la factura e incentivos de pago.
		Beneficios de fiabilidad		Reducción de interrupciones forzosas.
				Contribución en la reducción de riesgos por interrupciones del sistema.
Beneficios Colaterales	Algunos o todos los clientes.	Impactos en el mercado eléctrico	Corto plazo	Reducción rentable de precios durante los eventos DR.
				Impacto a corto plazo sobre los requerimientos de capacidad energética y precios del contrato.
			Largo plazo	Evitar o diferir gastos por aumentos de capacidad energética.
		Beneficios de fiabilidad		Diversidad de recursos disponibles para mantener la fiabilidad del sistema.
Otros Beneficios	Algunos o todos los clientes.	Robustez del mercado minorista		Ofrecen oportunidades de competitividad en innovación dentro de los mercados minoristas.
	ISO/RTP.	Elección de servicios mejorada		Opciones de gestión de costos de la energía para los clientes.
	LSE(Entidad de Servicio de Carga)	Beneficios de rendimiento en el mercado energético		La redistribución de la demanda, reduce las exigencias de capacidad del mercado energético.
		Beneficios Medioambientales		Reducción de las emisiones en sistemas de generación con altos niveles de contaminantes.
		Independencia/Seguridad energética		El mejor aprovechamiento de los recursos locales dentro de los estados o regiones reducen la dependencia de la oferta externa.

Capítulo 3

Algoritmos Genéticos

3.1. Problema de Optimización

La teoría de optimización clásica o programación está construida por un conjunto de resultados analíticos y numéricos enfocados a encontrar e identificar al mejor candidato dentro de un conjunto de alternativas, sin tener que enumerar y evaluar explícitamente todas esas alternativas [96]. En términos generales, un problema de optimización es, en general, un problema de decisión. Según [97], la resolución de un problema implica al análisis de distintos tópicos que se abordan para garantizar la mejor solución del problema planteado. Las partes principales que componen un problema de optimización son:

- Variables de decisión: El primer elemento clave en la formulación de problemas de optimización es la selección de las variables independientes que sean adecuadas para caracterizar los posibles candidatos y las condiciones de funcionamiento del sistema.
- Restricciones: Una vez determinadas las variables independientes, el siguiente paso es establecer, mediante ecuaciones o inecuaciones las relaciones existentes entre las variables de decisión. Estas relaciones son debidas, entre otras razones, a limitaciones en el sistema, a leyes naturales, a limitaciones tecnologías entre otras.
- Función objetivo: Finalmente, el ultimo tópico dentro de un problema de optimización es la función objetivo, también llamada función *Fitness*, índice de rendimiento o criterio de elección. Este es utilizado para decidir los valores adecuados de las variables de decisión que resuelven el problema de optimización. La función objetivo permite determinar los mejores valores para las variables de decisión.

Por otra parte, un punto clave para lograr un objetivo es definir apropiadamente el problema bajo estudio y en este sentido en [98] se define que, un problema de optimización consiste en encontrar $x^* \in S \subseteq X$ tal que:

$$x^* = \arg \min_{x \in S \subseteq X} f(x) \quad (3.1)$$

Donde X es una localidad finita del espacio de soluciones, $S \subseteq X$ es un subespacio de soluciones factibles, $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ es la función objetivo a minimizar, y x^* es la solución factible obtenida para el problema de optimización planteado.

Dicha terminología se traduce en que, dado el espacio de soluciones S y la función objetivo $f(x)$ que calcula coste/beneficio de cada solución. Entonces, resolver un problema de optimización significa determinar la solución factible $x^* \in S$ tal que $f(x^*) < f(x)$ para cualquier $x \in S$. En otras palabras, el problema consiste en encontrar la solución que minimice/maximice la función objetivo $f(x)$.

3.2. Programación Heurística

La idea más genérica del término heurístico según [99] está relacionada con la tarea de resolver inteligentemente problemas reales usando el conocimiento disponible. Normalmente dentro del campo de optimización las técnicas heurísticas operan como técnicas aproximativas de búsqueda local, quien mediante la evaluación y la caracterización de las soluciones candidatas dentro del vecindario de soluciones, determina la que mejor representa dicho conjunto. La búsqueda local utiliza únicamente la información obtenida del vecindario de soluciones para compararlo con la solución actual. Una técnica clásica de búsqueda local para minimizar una determinada función objetivo $f(x)$ se presenta en el Algoritmo 1 tomado de [100] y que se muestra a continuación:

Algorithm 1 Búsqueda local clásica

- 1: Generar solución inicial x^c
 - 2: **mientras** criterio de paro no se cumpla **hacer**
 - 3: solución candidata $x^n \in \mathcal{N}(x^c)$
 - 4: **sí** $f(x^n) < f(x^c)$ **entonces** $x^c = x^n$
 - 5: **fin mientras**
-

El método de búsqueda local presentado en el Algoritmo 1 realiza la selección aleatoria de una solución x^n del vecindario de soluciones en la línea 3. El algoritmo para garantizar la minimización de la función $f(x)$ se basa en el criterio de la línea 4. Donde el criterio de parada para esta técnica comúnmente depende de un número máximo de iteraciones.

Algunos métodos heurísticos para resolver un problema de optimización pueden ser más generales o específicas que otras. Los métodos específicos son diseñados únicamente para el problema a resolver, utilizando toda la información que se dispone de él en conjunto de un análisis teórico detallado. Estos métodos pueden presentar mayor rendimiento que los métodos generales. Sin embargo, estos últimos presentan otro tipo de ventajas, como la sencillez, la adaptabilidad y robustez de los procedimientos. Por otra parte, los métodos generales que surgen de las metaheurísticas pueden mejorar su rendimiento utilizando recursos computacionales y estrategias inteligentes [100].

3.3. Metaheurísticas

Los conceptos actuales de lo que es una metaheurística están basados en las diferentes interpretaciones de lo que es una forma inteligente de resolver un problema. Las metaheurísticas son estrategias inteligentes para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto rendimiento. Múltiples investigaciones han mostrado el notable incremento del interés en la implementación de estas técnicas para la resolución de distintos tipos de problemas, donde para la resolución de distintos problemas en el campo energético se tienen algunos trabajos como los presentados en [101–104] que optimizan procesos de despacho de cargas, flujos óptimos de energía, balanceo de líneas de transmisión, planificación de energías alternativas tales como las basadas en energías renovables y DR.

Por otra parte, existe una serie de propiedades que cualquier metaheurística debería cumplir para asegurar no solo su éxito, sino también su comprensión, adopción y propagación. En este sentido, en [99] se recomienda que las metaheurísticas planteadas deben considerar al menos las siguientes propiedades:

- Simple: Basada en un principio simple y claro, fácil de entender.
- Precisa: Las fases deben ser formuladas en términos concretos.
- Eficaz: Debe proporcionar soluciones de alta calidad cerca de los óptimos.
- Eficiente: Alta probabilidad de lograr las mejores soluciones en un buen tiempo de ejecución.
- General: Debe ser utilizable en una amplia variedad de problemas.
- Adaptable: Capaz de adaptarse a diferentes contextos de aplicación sin modificaciones importantes.
- Robusta: Debe ser sensible a pequeños cambios en el contexto del problema.

- Múltiple: Debe proporcionar soluciones alternativas de alta calidad.

Dicho esto, se han propuesto diferentes técnicas, con características y parámetros propios, sin embargo, todas se enfocan en resolver problemas de manera inteligente, autónoma y con un alto rendimiento. A continuación algunas de las clasificaciones generales que se les dan a estas [99]:

- Metaheurísticas de relajación: asociadas a los procedimientos para la resolución de problemas utilizando aproximaciones del modelo real, facilitando la solución del problema original.
- Metaheurísticas constructivas: quienes establecen estrategias para seleccionar los componentes con las que se construye una buena solución del problema, al incorporar pasos aleatorios con criterios adaptativos para la selección de los elementos de la solución.
- Metaheurísticas de búsqueda: las cuales guían los procedimientos que usan transformaciones o movimientos para recorrer el espacio de soluciones.
- Metaheurísticas evolutivas: enfocadas a los procedimientos basados en conjuntos de soluciones que evolucionan sobre el espacio de soluciones.

3.4. Algoritmos Genéticos

Para la resolución del problema de gestión óptimo de cargas residenciales presentado en el presente trabajo, se implementaron los Algoritmos Genéticos (*Genetics Algorithms*, conocido por sus siglas en inglés, GA). El GA es una técnica ampliamente conocida en la resolución de distintos problemas de optimización encajando dentro del ámbito de algoritmos evolutivos [105]. Según [106] los GA son algoritmos de búsqueda basados en la mecánica de selección natural y de la genética natural. Combinan la superveniencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de formación estructurado, aunque aleatorio, para constituir así un algoritmo de búsqueda que tenga algo de las genialidades de las búsquedas humanas.

En principio, el GA toma una población inicial que contiene un número de individuos donde cada uno representa una posible solución del problema. Cada individuo está codificado por un genotipo o cromosoma particular, que se ingresa a una función de aptitud para determinar así el rendimiento o fenotipo del individuo. Sobre la base de esta evaluación, se procede a someter la población a un mecanismo de selección, el cual toma un grupo de individuos para que sean las raíces de una nueva población,

del mismo modo que en la naturaleza, la selección natural es la determinante de qué individuos son los más aptos para evolucionar [105].

Tabla 3.1: Terminología genética y descripción computacional

Termino Genético	Descripción
Cromosoma	Solución
Genes	Parte de una solución
Locus	Posición del gen
Alelos	Valores del gen
Fenotipo	Solución decodificada
Genotipo	Solución codificada

La Tabla 3.1 muestra la correspondencia entre los términos de GAs y los de optimización. Entonces, en un organismo biológico, la estructura que codifica la prescripción especificando como se encuentra conformado el organismo se llama cromosoma. Se pueden requerir uno o más cromosomas para especificar el organismo completo. En este sentido el *cromosoma* del sistema hace referencia al *genotipo*, y el organismo resultante, *fenotipo*. Cada cromosoma comprende un conjunto de estructuras individuales llamadas *genes*. El gen representa una característica específica del organismo, y a la ubicación de este gen específico se le refiere como *locus*. Por otra parte, el valor que puede tomar dicho gen se le denomina *aleto*.

Según [107] los GAs funcionan bajo la implementación de dos operadores básicos, la recombinación sexual o cruce y la mutación. En la Figura 3.1a se muestra el operador cruce, este consiste en tomar un par de individuos para formar un nuevo individuo donde su cromosoma contendrá partes de los cromosomas de cada padre seleccionado. Luego, la Figura 3.1b muestra el paso del cromosoma por el operador de mutación, quien establece una probabilidad para la modificación del cromosoma, permitiendo la introducción de nuevas soluciones a la población en estudio.

La introducción de estos operadores permitirá la generación de una nueva población que puede sustituir parcial o completamente a la generación anterior, en función de determinadas políticas de elitismo. Generalmente el criterio de paro establecido para los GA se basa en el máximo número de generaciones. Tal como afirman en [105], después de varios ciclos de evolución, la población deberá contener individuos más aptos. En el Algoritmo 2 quién presenta un esquema básico del GA.

Donde S_ϕ representa la mejor solución resultante de la evaluación de cada uno de los individuos de la población P , Q representa los dos nuevos individuos resultantes de la selección de padres, y quienes se incluirán en la nueva población P' . Por último, como parámetros operativos del GA, se tiene P_{cruce} y $P_{mutacion}$ quienes representan las probabilidades de cruce y mutación respectivamente, i indica el número

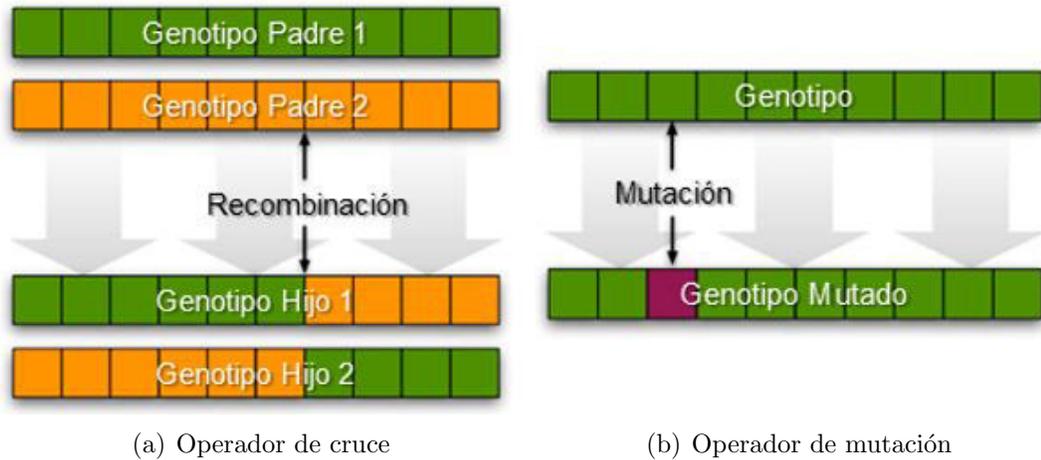


Figura 3.1: Operadores básicos del GA.

Algorithm 2 Algoritmo Genético

```

 $P \leftarrow \text{PoblaciónInicial}(P)$ 
 $\text{EvaluarFitness}(P)$ 
 $S_\phi \leftarrow \text{MejorSolución}(P)$ 
mientras criterio de paro no se cumpla hacer
     $P' \leftarrow \emptyset$ 
    para  $i \in N/2$ 
         $Q \leftarrow \text{SelecciónPadres}(P)$ 
        Si  $\text{Rand}[0,1) < P_{\text{cruce}}$  entonces
             $Q \leftarrow \text{Cruce}(Q)$ 
        fin si
        Si  $\text{Rand}[0,1) < P_{\text{mutacion}}$  entonces
             $Q \leftarrow \text{Mutación}(Q)$ 
        fin si
         $P' \leftarrow \text{AgregarSolución}(Q)$ 
    fin para
     $P \leftarrow \text{ReemplazarPoblación}()$ 
     $S_\phi \leftarrow \text{MejorSolución}(P, S_\phi)$ 
fin mientras
retornar  $S_\phi$ 

```

de generaciones y N el número de individuos de la población P .

3.4.1. Codificación binaria

La codificación binaria puede ser de gran utilidad para la resolución de problemas en los que se requieren de variables de activación para la representación de su solución. Una cadena binaria se emplea como el cromosoma que representa los valores reales de la variable x . Donde el tamaño de la cadena depende de la precisión que se requiera de la solución. Una representación podría ser $E = [10001010]$ donde $E[x]$ es una cadena de ocho genes, y donde el locus del i -ésimo gen se encuentra en la i -ésima posición del alelo $E[i]$.

3.4.2. Cruce

El cruce es el principal operador genético y representa un operador sexual. Este opera con dos cromosomas simultáneamente con la finalidad de obtener nuevas soluciones o hijos al recombinar las características de ambos cromosomas. Una forma simple de realizar un cruce es la de elegir de forma aleatoria un punto de corte, y generar el hijo combinando el segmento de un padre a la izquierda del punto de corte con el segmento a la derecha de la madre. De igual manera, se han propuesto otros tipos de selecciones para el cruce [108], sin embargo, la selección empleada en el presente trabajo es la llamada '*selección por torneo*'. Aquí se procede a seleccionar un grupo de individuos de manera aleatoria para luego disputarse entre ellos la posición de los dos individuos (padre y madre) más aptos para el cruce [109]. Por otra parte, La probabilidad del cruce pc define la relación entre el número de hijos producidos en cada generación y el tamaño de la población $nPop$. Una alta probabilidad de cruce permite una mayor y mejor exploración del espacio de soluciones. El rango de probabilidades recomendada por [110] es $pc \in [75\%, 95\%]$. Por otra parte, el cruce tradicional es el de un punto, y es introducido en [111], quienes eligen una posición de cruce de $i \in \{1, \dots, l - 1\}$ donde la cadena de bits de longitud l en forma aleatoria intercambia los bits a la derecha de esa posición entre ambos padres. Al incrementar el número de puntos en el cruce, se obtiene un operador de cruce *uniforme* [112]. Para el caso del cruce uniforme, para cada gen de la cadena del hijo existe una probabilidad de que el gen pertenezca al padre, y otra de que el gen pertenezca a la madre.

3.4.3. Mutación

La mutación es un operador del GA que permite la introducción de nuevas soluciones al problema bajo estudio. Este produce cambios ya sea en un solo bit del cromosoma o un conjunto completo del cromosoma. La probabilidad de mutación pm se define como el número total de genes en la población que deben ser mutados. La pm controla el porcentaje en el cual se permite la introducción de nuevas soluciones en la población. Si es muy baja, muchas soluciones que podrían haberse producido nunca se prueban. Si es muy alta, habrá mucha perturbación aleatoria, y los hijos comenzarán a perder su parentesco y el algoritmo perderá la habilidad de aprender de la historia de la búsqueda. En [110] se recomienda un rango de probabilidades de mutación de $pm \in [5\%, 10\%]$.

3.5. Función de Reparación

Generalmente las funciones de reparación pueden ser empleadas para traer de vuelta al espacio de soluciones a las soluciones inválidas que se generan debido a la aleatoriedad de los problemas heurísticos con restricciones. Algunos trabajos como [113–115] han propuesto distintas técnicas para traer de vuelta al espacio de soluciones factibles a las soluciones inválidas. Sin embargo, una forma simple dentro de los GAs para reintroducir un gen inválido al espacio factible de soluciones se presenta en [116]. Aquí se analiza el genotipo en búsqueda de bits fuera de las restricciones operativas, aplicando un operador de fuerza para devolver dentro de los límites permitidos a los bits generados fuera de estos. En la Figura 3.2 se muestra la aplicación del operador de fuerza entre dos bits considerados como inválidos dentro del genotipo del individuo, ya que incumplen con las restricciones del problema y con la continuidad genética respectivamente.

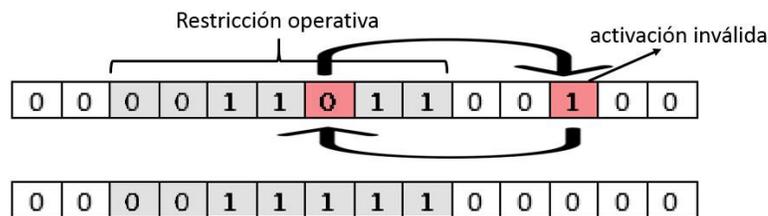


Figura 3.2: Operador de penalización.

Mayormente cuando se manejan conjuntos consecutivos de bits, es decir, cadenas de 0 ó 1 que se deben generar con determinada longitud para cumplir con

la condición operativa dentro de las restricciones establecidas, resulta útil aplicar este tipo de funciones de reparo, para garantizar la generación de soluciones factibles.

3.6. Problema de Optimización Multiobjetivo

Trabajando bajo el concepto de los eventos que se presentan comúnmente en la realidad, muchos de ellos pueden ser representados como problemas multiobjetivo, es decir, no poseen un único criterio medible por el cual se pueda definir que una solución es completamente satisfactoria. Entonces se hace referencia a un problema multiobjetivo a aquel que involucra más de una función objetivo a ser minimizada o maximizada según sea el caso. Sin embargo, en los problemas multiobjetivo se presenta cierto grado de conflicto. Es decir, no existe una solución (x^*) tal que todos las funciones objetivo sean minimizados o maximizados simultáneamente. Matemáticamente estos pueden ser representados tal como [117]:

$$\begin{aligned}
 & \min/\max(f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)) \\
 & \text{s.a. } g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, J \\
 & \quad h_k(x) = 0 \quad k = 1, \dots, K \\
 & \quad x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, N
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Donde M son las funciones objetivo a ser minimizadas/maximizadas, J las restricciones de desigualdad, K las restricciones de igualdad y N las variables de decisión.

En el área de los algoritmos evolutivos algunas técnicas se han presentado para la resolución de los problemas multiobjetivo. En este sentido, el enfoque de solución en base a sumatoria de pesos y en base a la construcción de un frente de Pareto son algunas de ellas.

3.6.1. Esquema en base a Pesos

Este método consiste principalmente en vincular todas las funciones objetivo conjuntamente empleando coeficientes ponderados o pesos en cada una de ellas [118]. Esto significa que el problema de optimización multiobjetivo se transforma en un problema de optimización simple de la forma:

$$\min \sum_{i=1}^k w_i f_i(\bar{x}) \tag{3.3}$$

donde i indica el objetivo a evaluar del conjunto de objetivos k ; $w_i \geq 0$ son los pesos que representan la importancia relativa de cada objetivo en la función a evaluar; y por último f_i son las funciones objetivo del problema a ser minimizadas.

Dado que los resultados de la resolución de un modelo de optimización empleando (3.3) pueden variar significativamente a medida que cambian los coeficientes de ponderación o pesos w_i , y dado que muy poco se sabe sobre cómo elegir estos coeficientes, un enfoque necesario es resolver el mismo problema para muchos valores diferentes de w_i [119]. Pero en este caso, el diseñador todavía se enfrenta, por supuesto, con la decisión de tener que elegir la solución más adecuada basada en su intuición.

Para los métodos numéricos que se pueden emplear para buscar el mínimo de (3.3), la representación de la solución no sólo depende de los valores de w_i asignados, sino también de las unidades en las que se expresan las funciones [120]. En este sentido, si queremos reflejar de cerca la importancia de los objetivos, todas las funciones deben normalizarse o llevar a una unidad en común. Asimismo, se puede transformar (3.3) a la forma:

$$\min \sum_{i=1}^k w_i f_i(\bar{x}) c_i \quad (3.4)$$

donde c_i son multiplicadores constantes que escalarán adecuadamente los objetivos.

3.6.2. Frente de Pareto

Si no se tiene ningún tipo de preferencia por parte de los operadores de decisión o igualdad de importancia en las diferentes funciones objetivo (f_1, f_2, \dots, f_M), no se puede establecer que una solución obtenida es mejor que otra si no existe un factor que la domine, haciendo referencia al cumplimiento del Teorema 1 de Dominancia de Pareto [121]. En este sentido, la solución a un problema multiobjetivo es el conjunto de soluciones no dominadas entre ellas llamadas frente de Pareto, la cual se establece bajo el criterio de cumplimiento del Teorema 2 de optimalidad de Pareto [121]. De esta manera, la formalización del frente de Pareto ha permitido la aplicación en entornos de optimización con objetivos múltiples y, en general, análisis de costo-beneficio [122]. En este sentido, a continuación se definen los dos teoremas que rigen un problema multiobjetivo bajo los criterios de la eficiencia de Pareto:

Teorema 1 (Dominancia de Pareto). *Dado un vector $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_M)$, se dice que domina a otro vector $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_M)$ si y sólo si:*

$$\forall i \in \{1, \dots, M\}, u_i \leq v_i \text{ y } \exists i_0 \in \{1, \dots, M\} \ u_{i_0} < v_{i_0}$$

Teorema 2 (Optimalidad de Pareto). *Una solución \mathbf{x}^* se dice que es Pareto-óptima si y sólo si no existe otro vector \mathbf{x} tal que $\mathbf{v} = f(\mathbf{x}) = (v_1, \dots, v_M)$ domine a $\mathbf{u} = f(\mathbf{x}^*) = (u_1, \dots, u_M)$.*

Lo que significa que, el punto \mathbf{x}^* es un óptimo de Pareto si no existe un vector \mathbf{x} que mejore alguna de sus funciones objetivo, sin que empeore simultáneamente alguno de las otras funciones objetivo. Por otra parte, esta definición puede ser representada gráficamente para su mayor entendimiento tal como la Figura 3.3, quien indica que las funciones objetivo del conjunto total de soluciones formarán respectivamente el frente de Pareto, el cual representa la frontera del espacio entre las soluciones factibles y no factibles para la solución del problema multiobjetivo bajo estudio.

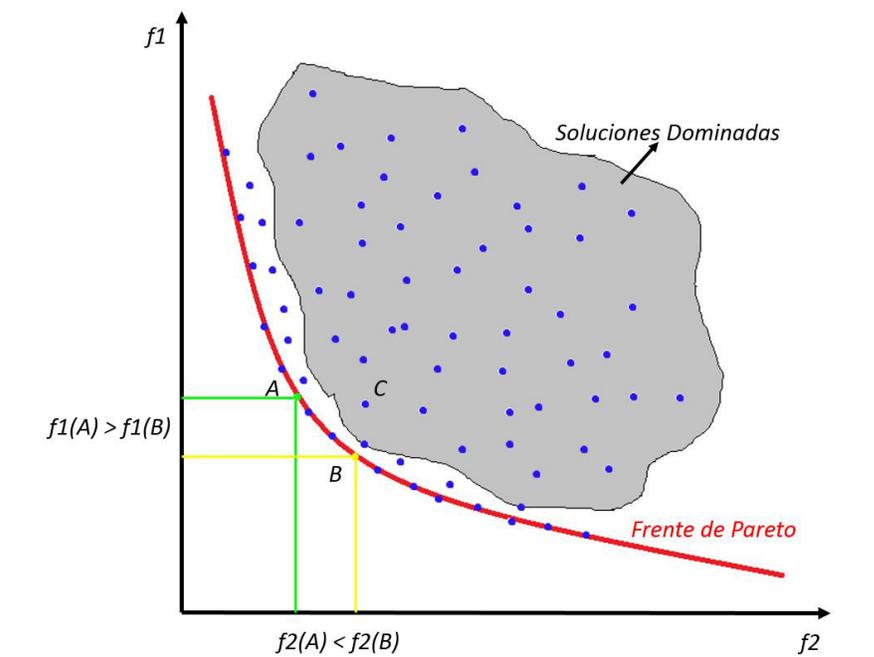


Figura 3.3: Frente de Pareto.

En la Figura 3.3 se muestra un conjunto de soluciones obtenidas de la multievaluación de las funciones objetivos del problema bajo estudio. Aquí se muestra que, las soluciones que no se encuentran sobre el Frente de Pareto representan a la población de soluciones dominadas por las soluciones sobre la frontera de Pareto, como en el caso de la solución C, la cual representa una solución dominada por el conjunto de soluciones A y B del frente de Pareto. Las soluciones ubicadas sobre el frente de Pareto constituyen un conjunto de soluciones factibles no dominadas entre ellas. Ahora bien, la selección de la solución factible que satisfaga al problema bajo estudio se condiciona a la selección de la solución que mejora al menos un objetivo respecto a las demás soluciones no dominadas del frente de Pareto.

Capítulo 4

Modelados Matemáticos

4.1. Nano Red de nivel Residencial

El concepto de Nano Red se deriva de emplear un sistema eléctrico de pequeña escala enfocado a un nivel de consumo local o residencial, buscando satisfacer las diferentes exigencias energéticas de los residentes y logrando una mayor autonomía del sistema eléctrico principal. La Nano Red planteada está constituida de cargas de nivel residencial, DGUs basadas en energías renovables y DSUs para el almacenamiento de la energía excedente proveniente de la Nano Red. Ahora bien, un adecuado modelado de estos elementos garantiza mayor precisión en el estudio del comportamiento del sistema propuesto, por lo que finalmente la integración de estos elementos conformará un simulador de producción y consumo energético que servirá como herramienta de análisis para la Nano Red ante diferentes ambientes operativos. En este sentido, se parte del concepto de Smart Grids para desarrollar un sistema enfocado a la administración de energía a un nivel doméstico. Primeramente se plantean y simulan los elementos de generación considerados para conformar la Nano Red de nivel residencial, estos representan el comportamiento operativo de un conjunto de celdas fotovoltaicas y de una turbina de viento respectivamente, también se plantea el modelo de una unidad de almacenamiento la cual considera diversos aspectos operativos de una batería comercial, se describe un modelo que representa la actividad de consumo de un usuario residencial promedio, se desarrollan y evalúan los modelos de las cargas de nivel residencial que se consideraron para esta investigación, incluyendo modelos linealizados de sistemas de calefacción y enfriamiento. Por último, se plantea la función multiobjetivo para el problema de optimización bajo estudio con sus respectivas restricciones operativas.

4.2. Modelado de las DGUs

Al hacer referencia al termino de DGU se habla de una unidad de generación distribuida como se mencionó en el capítulo 2 de esta investigación. La integración de estas unidades a nivel residencial podría proporcionarles a los usuarios de la red menor dependencia del sistema eléctrico principal. Los modelos de generación considerados se encuentran simplificados. Por otra parte, los modelos presentan sensibilidad ante las condiciones medio ambientales del día, proporcionando un comportamiento operativo más real. La integración de los aportes de cada modelo se realizó mediante la combinación de los aportes energéticos de cada unidad, para ello se plantea un sistema de generación híbrido que suma la energía resultante de cada generador.

4.2.1. Modelo del aerogenerador

Modelo Operativo

Un aerogenerador es una unidad de generación eléctrica que funciona convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica a través de un rotor tipo hélice, y en energía eléctrica gracias a un alternador. En [123] se estudia un modelo simplificado que elimina el análisis de los elementos mecánicos y eléctricos que conforman a la turbina de viento, enfocándose únicamente en el comportamiento operativo del aerogenerador en términos de producción de potencia dependiente del viento y tal como se muestra en la ecuación 4.1, el aporte energético de la unidad de generación en estudio dependerá directamente de las condiciones de viento establecidas.

$$P^w(t) = \begin{cases} 0, & \text{Sí } v_w < V_{ci} \text{ o } v_w > V_{co} \\ (a + bv_w + cv_w^2)P_{rat}^w, & \text{Sí } V_{ci} \leq v_w \leq V_r \\ P_{rat}^w, & \text{Sí } V_r \leq v_w < V_{co} \end{cases} \quad (4.1)$$

Donde P^w y P_{rat}^w representan la potencia entregada y nominal dada por la turbina de viento respectivamente, v_w el perfil de viento en $[m/s]$, V_{ci} , V_{co} y V_r representan las condiciones operativas en $[m/s]$ para corte energético, desacoplamiento del rotor y aporte máximo de energía respectivamente. Por último, los parámetros a , b y c representan constantes de la sección no lineal del modelo, y fueron estimados tal como se indica en [124].

Pruebas Simuladas

A continuación se valida el modelo de la turbina de viento definido por la ecuación 4.1, simulando diferentes escenarios operativos:

Tabla 4.1: Condiciones operativas para la turbina de viento [123].

V_{ci}	V_r	V_{co}	P_{max}^w
3.5 [m/s]	12 [m/s]	23 [m/s]	1 [kWh]

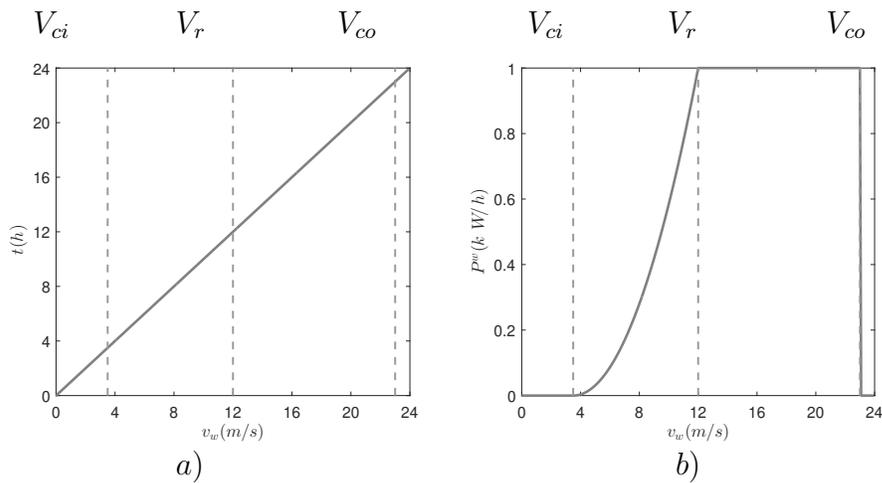


Figura 4.1: a) perfil de viento lineal, b) comportamiento operativo de la turbina de viento.

El primer escenario se presenta en la Figura 4.1 donde se demuestra el comportamiento de la turbina de viento para las tres condiciones operativas establecidas en el modelo de la Ecuación 4.1. Los valores para las condiciones operativas fueron tomadas de [123] y se muestran en la Tabla 4.1. Por otra parte, el perfil de viento v_w se establece como una recta con pendiente positiva unitaria $t = v_w$ siendo t el tiempo en horas [h]. Aquí el perfil de viento se introduce al modelo logrando validar que este solo aportará su máximo de potencia si el perfil de viento se encuentra entre V_r y V_{co} . Para valores por encima de V_{co} o por debajo de V_r causarían la disminución o incluso la desconexión del aporte energético.

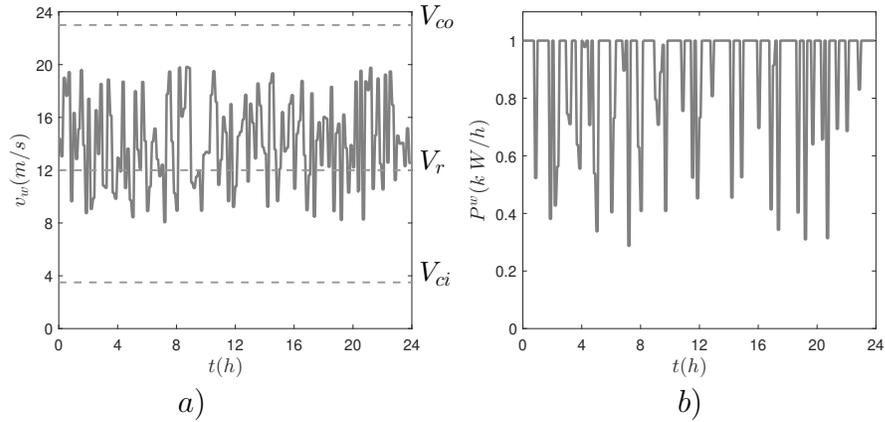


Figura 4.2: a) perfil de viento variable, b) comportamiento operativo de la turbina de viento.

El segundo escenario se presenta en la Figura 4.2. Aquí se muestra el comportamiento de la turbina de viento para un perfil de viento aleatorio, donde de igual forma el aerogenerador debe seguir cumpliendo con las restricciones operativas de V_{ci} , V_r y V_{co} establecidas en la Ecuación 4.1 para los parámetros de la Tabla 4.1.

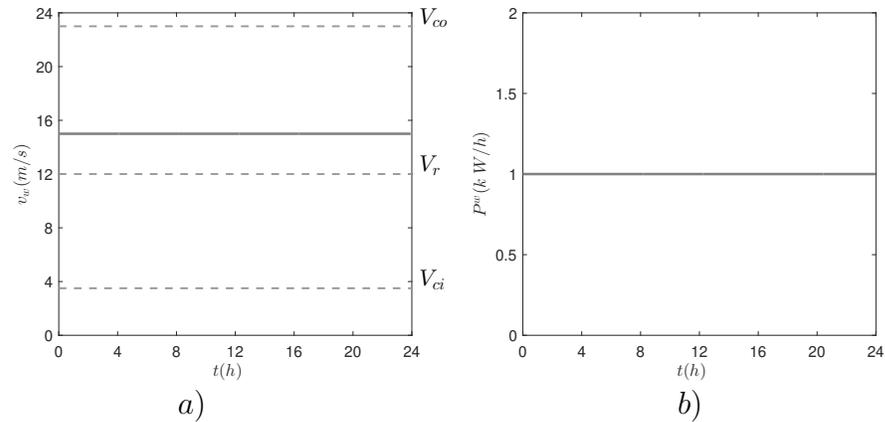


Figura 4.3: a) perfil de viento constante, b) comportamiento operativo de la turbina de viento.

El tercer y último escenario se presenta en la Figura 4.3. Para este caso se plantea un perfil de viento constante en el tiempo, por lo que la energía aportada por la turbina de viento sigue este mismo comportamiento. Cabe destacar que el aporte de energía del sistema dependerá del valor de perfil de viento que se establezca, ya que si se encuentra entre V_r y V_{co} se podría garantizar el máximo aporte, ya fuera de esas condiciones queda sujeto a un aporte por debajo del máximo o incluso la desconexión de la turbina de viento.

En el sentido de los resultados obtenidos de las pruebas simuladas, dicho

modelo se consideró conveniente de ser incluido como unidad de generación al HEMS propuesto en la presente investigación.

4.2.2. Modelo del panel fotovoltaico

Modelo Operativo

Un panel solar se representa como una unidad de generación distribuida, y su aporte energético depende directamente del nivel de incidencia solar que sobre él se irradie. En [123] se estudia un modelo simplificado del comportamiento operativo de un panel solar. El modelo presenta sensibilidad ante factores ambientales tales como temperatura externa y perfiles de irradiancia. Por otra parte, también permite la adaptación de más de una celda solar, representando una aproximación real a lo que sería la operatividad de un arreglo de paneles fotovoltaico en términos energéticos.

$$P^{pv}(t) = \underbrace{\eta_{pv} A_p N_{pv} \phi_s(t)}_{P_{ap}} \underbrace{\{1 - \gamma(T_c(t) - T_{cref})\}}_{\lambda_T} \quad (4.2)$$

En la Ecuación 4.2 se presenta el modelo extraído de [123], donde η_{pv} , A_p y N_{pv} representan la eficiencia del panel, el área en [m^2] y el número de paneles respectivamente; ϕ_s el perfil de irradiancia solar dada en [kWh/m^2]; γ el coeficiente de temperatura fijado en (0,005 por cada $^{\circ}C$); T_c la temperatura externa en [$^{\circ}C$]; T_{cref} la temperatura ambiente fijada en ($25^{\circ}C$); P_{ap} la potencia aportada por el panel o por el conjunto de paneles en [kWh]; λ_T las pérdidas por temperatura y P^{pv} la potencia disponible dada en [kWh].

Pruebas Simuladas

El modelo del panel presenta sensibilidad ante las variaciones de la irradiancia ϕ_s y temperatura, y con el fin de validar su comportamiento, se consideraron los parámetros de la Tabla 4.2 y se presentan a continuación algunos escenarios operativos con los que se evaluó el modelo presentado:

Tabla 4.2: *Parámetros considerados para el modelo del panel*

η_{pv}	A_p	N_{pv}
14.55 %	1.64 [m^2]	13

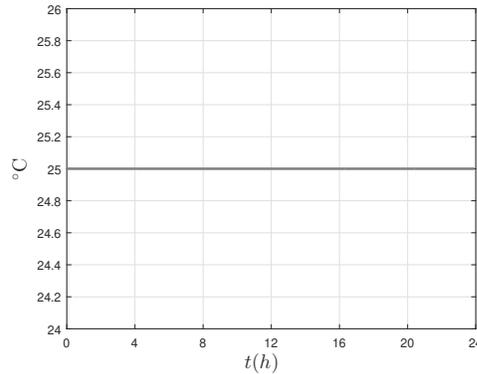


Figura 4.4: Perfil de temperatura constante para un panel solar

En la Figura 4.4 se muestra un perfil de temperatura constante que es introducido al modelo del panel, de igual manera este recibió un perfil de irradiancia ideal tal como se muestra en la Figura 4.5a. Finalmente, la Figura 4.5b muestra lo que fue el comportamiento del modelo sometido bajo las condiciones operativas establecidas idealmente. Donde, debido al perfil de temperatura constante son eliminadas las pérdidas, permitiendo el aporte máximo de energía por parte de las unidades consideradas.

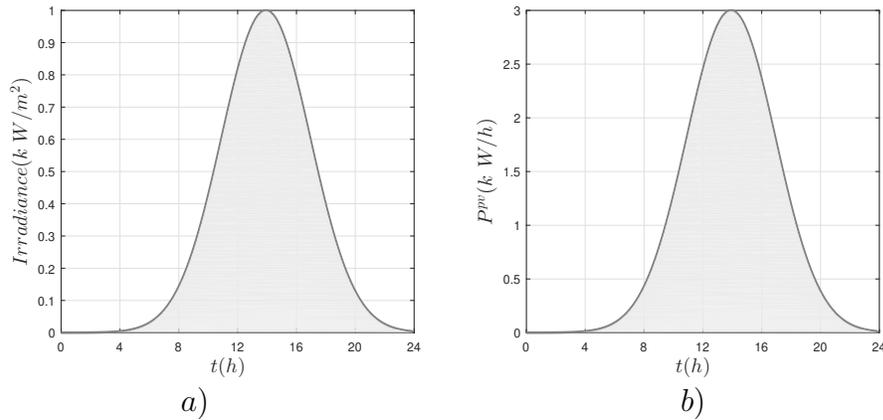


Figura 4.5: a) perfil de irradiancia, b) comportamiento operativo del panel solar.

El rendimiento de los paneles puede verse afectado debido a las condiciones climáticas de cada estación del año, es decir, para temporadas donde los niveles de nubosidad y bajas temperaturas predominan, el aporte de energía de estos disminuirá considerablemente, pero en las temporadas en el que la temperatura y la incidencia solar es alta, el aporte energético será mayor.

Solo con fines de comprobar lo mencionado, para el modelo de la Ecuación

4.2 se consideraron dos escenarios. El primero presenta un perfil de temperatura promedio de un día de invierno. El segundo presenta un perfil de temperatura promedio para un día de verano. Ambos casos se establecen con la finalidad de comprobar el comportamiento de los paneles ante las variaciones de la temperatura durante un día. Dicho esto, los dos escenarios son presentados a continuación:

Los escenarios son presentados en la Figura 4.6, las Figuras 4.6a y 4.6b representan los perfiles de temperatura para un día promedio de invierno y verano respectivamente. Por otra parte, se tiene en la Figura 4.7 los perfiles de Irradiancia para cada escenario, siendo la Figura 4.7a el perfil promedio para una temporada de invierno y la Figura 4.7b el perfil promedio para una temporada de verano. Ahora bien, solo para fines prácticos se generaron de manera simulada los perfiles que se presentan en las siguientes figuras y estos fueron introducidos al modelo del panel, sujetos de igual forma a las condiciones operativas de la Tabla 4.2.

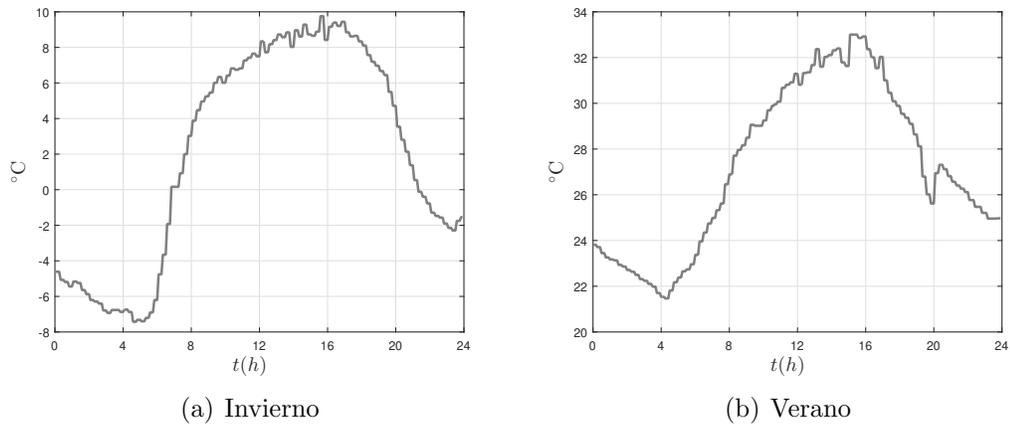


Figura 4.6: *Perfiles de temperatura simulados.*

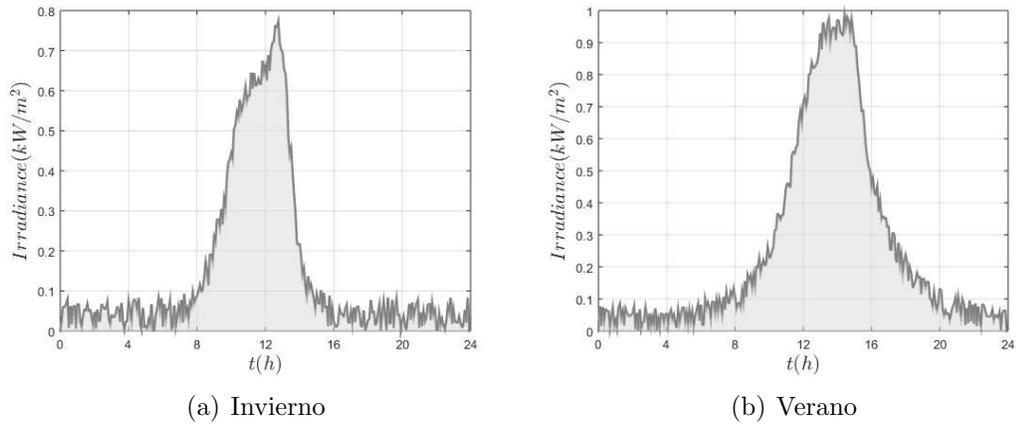


Figura 4.7: *Perfiles de irradiancia simulados.*

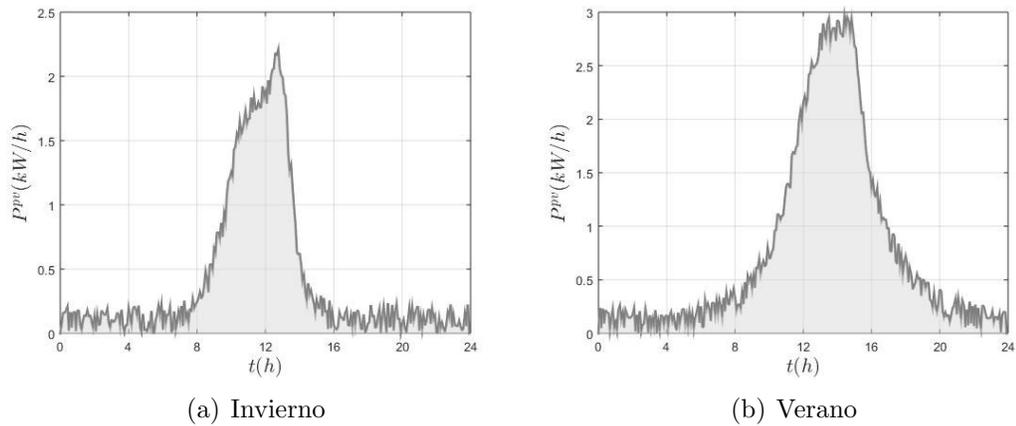


Figura 4.8: *Aporte energético.*

La Figura 4.8 muestra los resultados obtenidos para cada escenario planteado, tal como se esperaba, al reducir los niveles de irradiancia en las celdas solares se reduce en proporción el rendimiento de estas unidades, y en perspectiva a estos resultados obtenidos, se puede deducir que un mayor suministro energético puede ser garantizado los días de verano en el que la temperatura y los niveles de irradiancia son altos. Por lo que el modelo indicado es considerado conveniente para ser incluido en la presente propuesta.

4.2.3. Sistema de Generación híbrido

Modelo Operativo

Cuando se considera la interoperabilidad entre distintas DGUs se puede hacer referencia a un sistema de generación energético híbrido. Aquí entra en juego la utilidad de las distintas DGUs que se incorporen al sistema. Debido a que parte de los problemas que enfrentan las DGUs basadas en energías renovables es la aleatoriedad de las condiciones ambientales, la integración de distintas unidades podría mejorar el rendimiento del sistema de generación. Un ejemplo sería un panel solar, donde su aporte energético se debe al nivel de incidencia solar, por lo que durante los periodos de alta nubosidad o plena oscuridad, su aporte energético puede decaer considerablemente o llegar a cero. En este sentido, la integración de otra unidad tal como un aerogenerador podría cubrir con parte de la demanda energética durante esos periodos de tiempo si las condiciones ambientales lo permiten. Entonces, un sistema de generación híbrido se establece con la finalidad de que cada unidad de generación complemente las deficiencias de las demás unidades, conformando un sistema más eficiente e independiente del sistema eléctrico principal al momento de cubrir con la demanda energética.

La Ecuación 4.3 describe el suministro de potencia para cada instante de tiempo t del sistema de generación híbrido empleado. Este representa un sistema cuyo aporte depende directamente de la disponibilidad energética en el instante t de cada unidad de generación e incluida.

$$P_{ng}(t) = \sum_{e \in \{wm, pv\}} P_e(t) \quad (4.3)$$

Donde P_e representa el aporte energético en $[kW]$ por cada unidad e incluida al sistema, wm y pv es la nomenclatura empleada para hacer referencia a la turbina de viento y al panel solar respectivamente y P_{ng} la potencia aportada por las energías renovables durante el instante de tiempo t .

Pruebas Simuladas

Como comprobación del modelo se integran las dos unidades de generación modeladas en las Ecuaciones 4.1 y 4.2 bajo las condiciones operativas de las tablas 4.1 y 4.2 respectivamente. Los aportes por unidad de generación se muestran en la Figura 4.9, donde la Figura 4.9a presenta el aporte de potencia por parte de las celdas solares y la Figura 4.9b el aporte de potencia por parte de la turbina de viento.

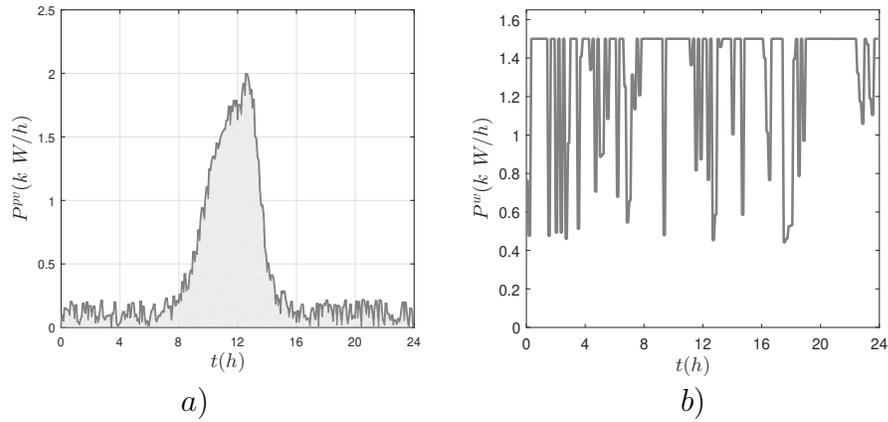


Figura 4.9: Aporte de potencia de las energías renovables.

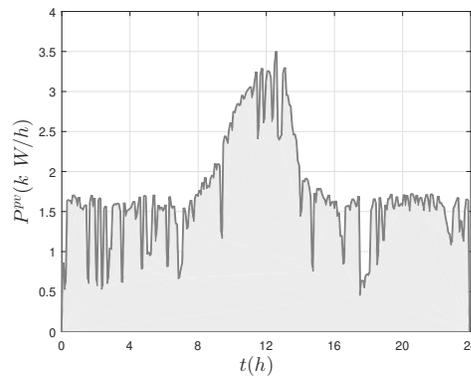


Figura 4.10: Perfil de disponibilidad energética obtenido como resultado de la combinación de los perfiles de disponibilidad solar y de viento.

La Figura 4.10 muestra la salida del sistema de generación híbrido que incluye el aporte de las unidades de generación consideradas. Como resultado se muestra un perfil de disponibilidad energética para un día entero, presentado un pico de disponibilidad aproximadamente al medio día, debido al comportamiento operativo del panel solar, el cual solo aporta su máximo en los periodos de mayor irradiancia. Sin embargo, la turbina de viento compensó los periodos donde el aporte de las celdas solares fue pobre.

4.3. Actividad del Usuario

La actividad de los usuarios residenciales define el comportamiento de los hábitos de consumo que este tiene durante su estancia en el hogar, es por esto que una forma de analizar su actividad sería a través de la medición de su consumo energético. Para analizar los patrones de consumo de los usuarios residenciales, en el trabajo [16] se propone un factor denominado *nivel de actividad* (en inglés, *Activity Level*, por sus siglas AL) para cargas de nivel residencial, donde representan el nivel de actividad por hora durante el horizonte de consumo. Para obtener un valor que defina la actividad de un carga residencial, pueden utilizarse datos históricos de consumo proporcionados por medidores inteligentes instalados en las residencias. Por lo tanto, los datos de consumo medidos durante las semanas, meses o años pueden ser utilizados para predecir el nivel de consumo para un día en particular.

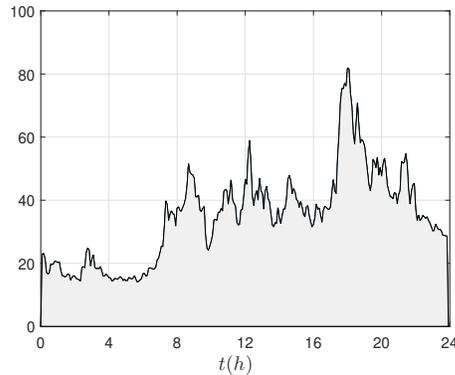


Figura 4.11: Nivel de actividad del usuario dado en (%/h).

La Figura 4.11 muestra un ejemplo de consumo energético para un día de verano en una residencia. Las medición se realizó a través de un medidor inteligente en intervalos de cada 5 minutos durante un día. La medición adquirida es normalizada respecto al consumo total, partiendo de la idea de [16]. Así, la siguiente fórmula es usada para calcular el nivel de actividad para el intervalo t de un día d :

$$AL(d, t) = \frac{P(d, t)}{\sum_{t=1}^{288} P(d, t)} \quad (4.4)$$

donde P representa la medición de consumo energético del usuario en un intervalo t para el día d .

4.4. Cargas de Nivel Residencial

A nivel residencial cuando se hace referencia a una carga, mayormente se refiere a un electrodoméstico, y este opera según los requerimientos de los distintos usuarios. Estos dispositivos son adquiridos por los residentes con la finalidad de aumentar su nivel de confort durante su estancia en el hogar. Sin embargo, la gestión inapropiada de estos puede reflejarse en el incremento significativo de los niveles de consumo. Un modelo de estos elementos permite observar el comportamiento operativo al ser activados durante cualquier periodo del día. Por otra lado, gran parte de estos dispositivos no requieren de un modelo operativo detallado de cada uno de sus componentes, sino más bien un modelo que represente el perfil de consumo al ser activado.

Tabla 4.3: *Cargas residenciales [125]*

Electrodoméstico	Nomenclatura	Consumo [KW/h]
Estufa Eléctrica	ee	2.30
Secadora de Ropa	sr	2.5
Máquina de Lavado	ml	0.2
Lava platos	lp	2.17
Bomba de Agua	ba	2
Calentador de Agua	ca	4.5
Aire Acondicionado	ac	1.53
Calefactor Eléctrico	ce	2.40

Para el presente trabajo solo se consideraron las cargas que requieren mayor atención debido a que representan un consumo significativo a nivel residencial. En la Tabla 4.3 se muestra los elementos considerados junto a su nomenclatura y consumo de potencia por hora.

Modelo operativo de cargas residenciales

Para las cargas residenciales empleadas, la utilidad de estas representa un consumo energético constante al ser operadas dentro de un intervalo de tiempo finito. Por lo que, se puede decir que el intervalo operativo puede ser visto como el periodo de activación de la carga tal como se muestra en la Ecuación 4.5. Sin embargo, dicha variable de activación dependerá de las condiciones operativas de la carga en cuestión.

$$S_e(t) = \begin{cases} 1, & \text{Sí } t_{ini} \leq t \leq t_{fin} \forall e \notin \{ac, ce\} \\ 0, & \text{Sí otro caso} \end{cases} \quad (4.5)$$

Para la Ecuación 4.5 S_e representa la activación de la carga e para un periodo de tiempo t entre un tiempo operativo inicial t_{ini} y un tiempo operativo final t_{fin} . La potencia total consumida por la carga está representada por el valor acumulado de energía por hora del día, y en este trabajo se propone la siguiente ecuación para su cálculo:

$$Pt_e(t) = Pt_e(t - 1) + \Delta t(P_e(t)S_e(t)) \quad (4.6)$$

donde $Pt_e(t)$ representa la potencia acumulada para una carga e durante un periodo de tiempo t , Δt indica el paso entre muestras y P_e la potencia consumida por el electrodoméstico e .

Pruebas Simuladas

Las pruebas simuladas fueron realizadas con la finalidad de mostrar el comportamiento de cada uno de los elementos considerados como cargas residenciales. Cabe destacar que a diferencia del aire acondicionado y del calefactor, el comportamiento de cada electrodoméstico se muestra en función de su encendido durante 1 hora continua de uso. Entonces, el resultado del comportamiento operativo se muestra a continuación para cada carga de la tabla 4.3:

Tabla 4.4: *Horario operativo de cargas residenciales*

Carga e	t_{ini}	t_{fin}
ee	12:00	13:00
sr	15:00	16:00
ml	11:00	12:00
lp	11:00	12:00
ba	08:00	09:00
ca	07:00	08:00

En la Tabla 4.4 se definen los horarios operativos establecidos para cada una de las cargas a excepción del aire acondicionado y calefactor eléctrico, esto debido a que las pruebas del funcionamiento dinámico de las unidades reguladoras de temperatura se exponen más adelante. Dicho esto, se muestran a continuación los resultados obtenidos de las pruebas simuladas:

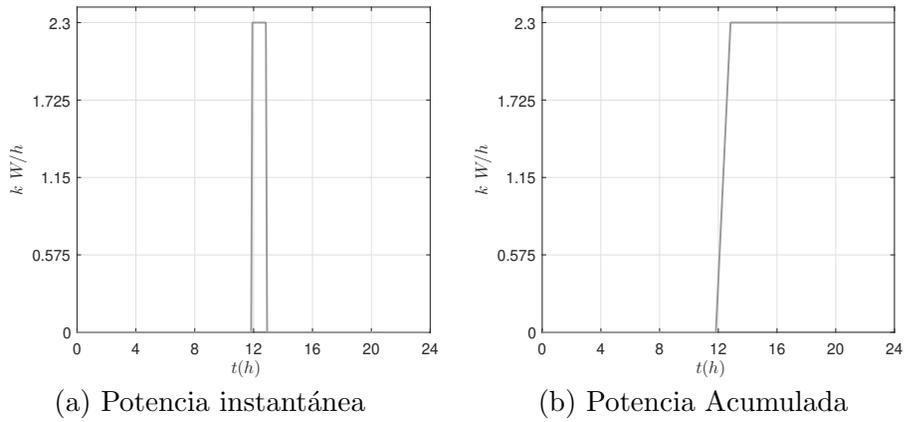


Figura 4.12: *Comportamiento de la estufa eléctrica.*

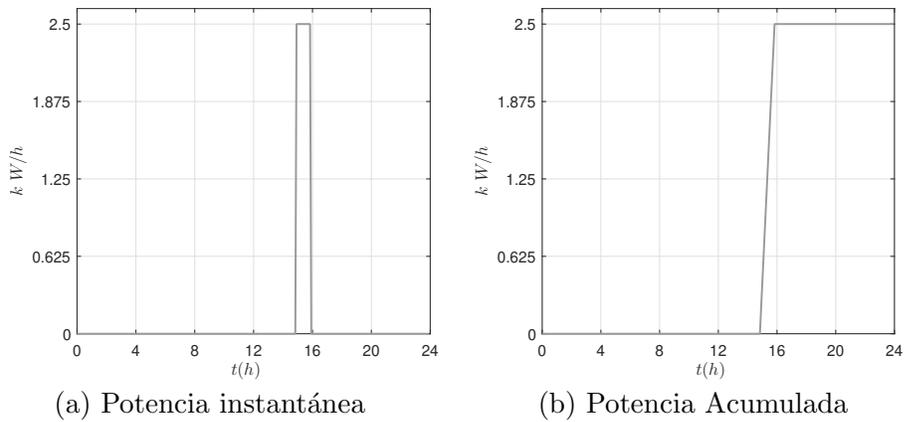


Figura 4.13: *Comportamiento de la secadora de ropa.*

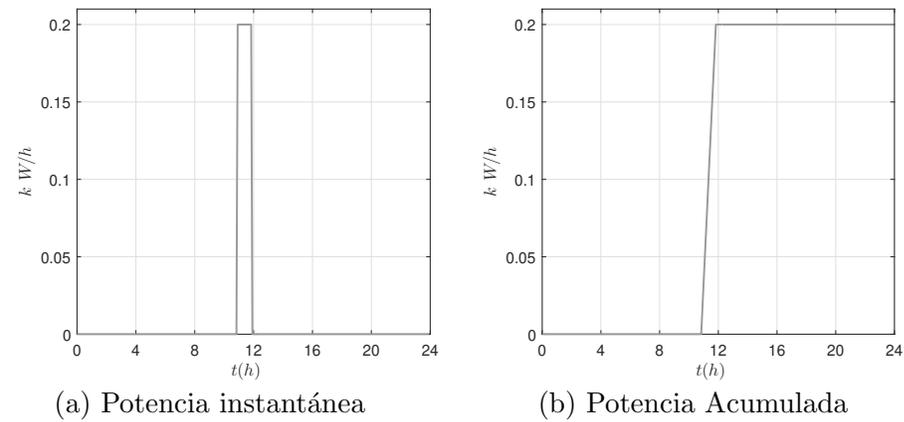


Figura 4.14: *Comportamiento de la maquina de lavado.*

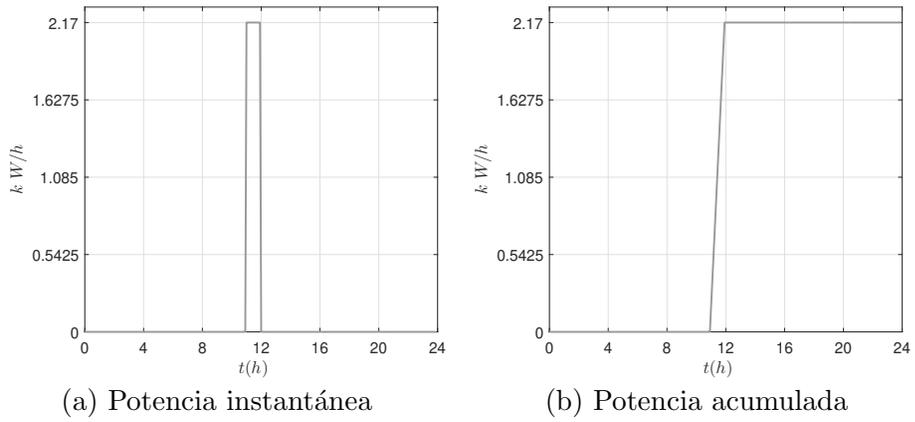


Figura 4.15: Comportamiento del lavaplatos eléctrico.

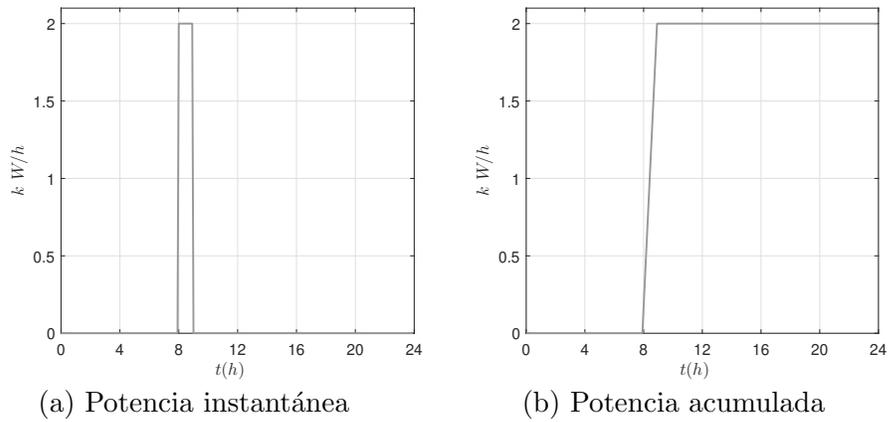


Figura 4.16: Comportamiento de la bomba de agua.

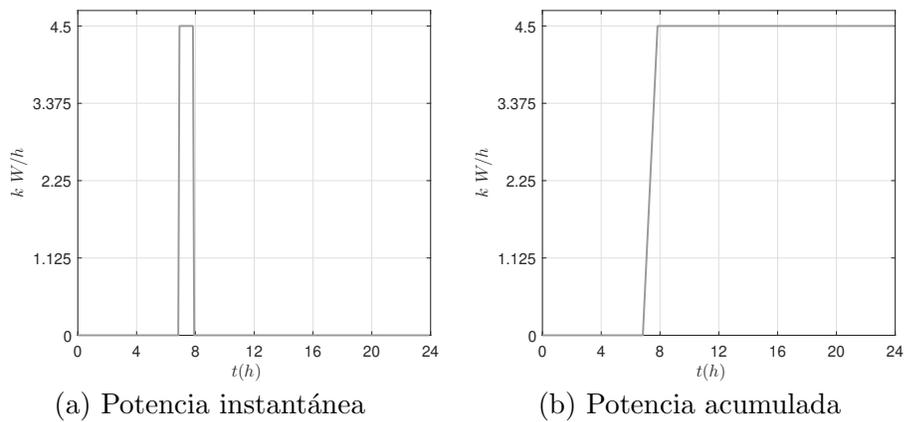


Figura 4.17: Comportamiento del calentador de agua.

En las Figuras 4.12-4.17 respectivamente, se muestra el comportamiento operativo de cada carga al ser activadas, su utilidad se da durante el periodo de una hora y la gráfica del estado representa la potencia instantánea requerida por la carga durante el periodo de encendido. Donde para la potencia instantánea $P_{i_e}(t)$ del electrodoméstico e en el instante de tiempo t se tiene que:

$$P_{i_e}(t) = P_e(t)S_e(t) \quad (4.7)$$

Modelo Operativo del Aire Acondicionado y del Calefactor Eléctrico

Parte del trabajo de analizar el comportamiento de distintos electrodomésticos es evaluar el porcentaje de consumo individual que estos representan en el hogar. Los sistemas de refrigeración y calefacción representan elementos de alto consumo energético en las residencias, por lo que un modelo que describe su comportamiento ha sido formulado con la finalidad de lograr un mejor despacho de estas cargas. Para el estudio de su comportamiento se consideraron algunos factores tales como el efecto que tiene la temperatura exterior, y la actividad del usuario para la regulación de la temperatura por parte de estos sistemas en el interior de la residencia. Por otra parte, también se consideraron las preferencias del usuario, permitiéndole escoger el nivel de temperatura deseada y el nivel de tolerancia por encima y por debajo de la temperatura que este considera agradable. Así, el cálculo del nivel de tolerancia se realizó utilizando la ecuación que se propone a continuación:

$$\begin{aligned} T_{sp}^{max} &= T_{sp} + T_{tol} \\ T_{sp}^{min} &= T_{sp} - T_{tol} \end{aligned} \quad (4.8)$$

donde T_{sp} define el valor de temperatura deseado por el usuario, T_{tol} el valor de tolerancia permitido, por último T_{sp}^{min} y T_{sp}^{max} serán los límites de temperatura calculados.

Se parte de los modelos calefacción y refrigeración presentados en [16], los modelos que se presentan describen la dinámica de los cambios de temperatura dentro de una residencia. Los modelos operativos vienen dados por las Ecuaciones [4.9-4.11] [16] respectivamente. Estos representan el efecto que tiene la temperatura exterior, la actividad del usuario, y el encendido del aire acondicionado o de la calefacción sobre la temperatura interior de la residencia para un periodo de tiempo t .

$$S_e(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{Sí } T_{in}(t) > T_{sp}^{max}(t), e = ac \\ 0, & \text{Sí } T_{in}(t) < T_{sp}^{min}(t), e = ac \end{cases} \quad (4.9)$$

$$S_e(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{Sí } T_{in}(t) > T_{sp}^{max}(t), e = ce \\ 0, & \text{Sí } T_{in}(t) < T_{sp}^{min}(t), e = ce \end{cases}$$

$$s.a \begin{cases} T_{sp}^{min}(t) \leq T_{in}(t) \leq T_{sp}^{max}(t) & \forall t \in T_e, e = ac \text{ ó } ce \\ S_{ac}(t) + S_{ce}(t) \leq 1 & \forall t \in T \end{cases} \quad (4.10)$$

$$T_{in}(t) = T_{in}(t-1) + \Delta t[\beta_e AL(t) - \alpha_e S_e(t) + \rho_e(T_{out}(t) - T_{in}(t))] \quad \forall t \in T, e = ac \quad (4.11)$$

$$T_{in}(t) = T_{in}(t-1) + \Delta t[\beta_e AL(t) - \alpha_e S_e(t) - \rho_e(T_{in}(t) - T_{out}(t))] \quad \forall t \in T, e = ce$$

donde S_e es una variable de estado que indica el encendido o el apagado de la unidad reguladora de temperatura e para un periodo T de tiempo t . La Ecuación 4.10 establece las restricciones del modelo para un periodo T_e de una carga e dado el tiempo t . Por último, en la Ecuación 4.11 AL representa el nivel de actividad del usuario, T_{out} el nivel de temperatura exterior, Δt el paso de tiempo, β_e , α_e y ρ_e , son variables estimadas que describen propiamente el comportamiento tanto del aire acondicionado como del calefactor eléctrico; por su parte β_e representa el efecto que tiene el nivel de actividad del usuario en la residencia; α_e el efecto que tiene el encendido del aire acondicionado o de la calefacción según sea el caso; ρ_e describe el efecto que tiene la temperatura externa e interna respectivamente en la temperatura estimada $T_{in}(t)$ de la residencia.

Pruebas Simuladas

Para los sistemas de regulación de temperatura, como el aire acondicionado y el calefactor eléctrico, se muestra la utilidad en función de la regulación de la temperatura dentro de la residencia. Por otra parte, consideran el valor de temperatura deseado por el usuario y el nivel de tolerancia permitido. Se analizó el efecto que tiene el nivel de temperatura externa a la casa y la actividad del usuario sobre la temperatura interna de la residencia. Los resultados se muestran a continuación:

Para el aire acondicionado se consideró un perfil de temperatura externa promedio para un día de verano, y un valor de temperatura deseado de 20°C. Por

otra parte, se consideraron dos casos, el primero mostrado de la figura 4.18 donde se consideró una tolerancia de $\pm 1^\circ\text{C}$, y el segundo de la figura 4.19 donde no se desea un valor de tolerancia.

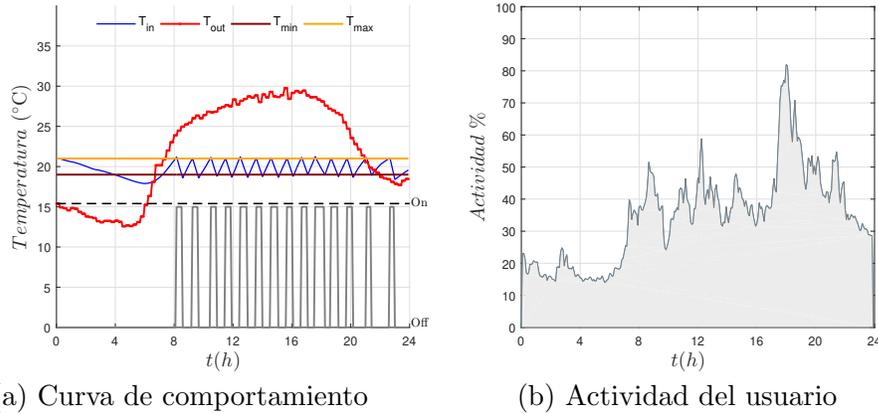


Figura 4.18: Comportamiento del aire acondicionado con nivel de tolerancia permitido.

Cabe resaltar que para las figuras 4.18a y 4.19a se muestra el perfil de temperatura externo T_{out} , el perfil de temperatura en la residencia T_{in} , los límites operativos T_{min} y T_{max} , y el estado de activación $S_e(t)$ (on/off) para el aire acondicionado en un instante de tiempo t .

Para el calefactor eléctrico se consideró un perfil de temperatura externa promedio para un día de invierno, y un valor de temperatura deseado de 20°C . De igual manera como en el caso del aire acondicionado, se consideraron dos escenarios, el primero mostrado en la figura 4.20 donde se consideró una tolerancia de $\pm 1^\circ\text{C}$, y el segundo en la figura 4.21 donde se establece una tolerancia de $\pm 0^\circ\text{C}$.

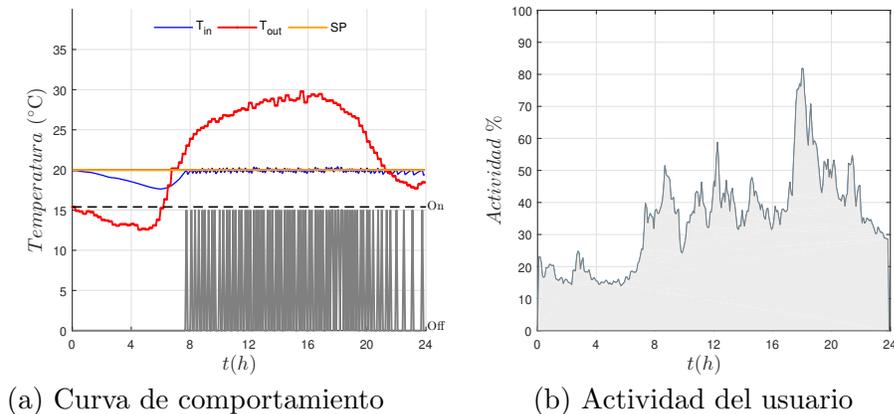


Figura 4.19: Comportamiento del aire acondicionado sin nivel de tolerancia permitido.

En las Figuras 4.20a y 4.21a se muestra el perfil de temperatura externo T_{out} , el perfil de temperatura en la residencia T_{in} , los limites operativos T_{min} y T_{max} , y el estado de activación $S_e(t)$ (on/off) para el aire acondicionado en un instante de tiempo t . por otra parte, en las Figuras 4.20b y 4.21b se muestra el nivel de actividad del usuario, mostrando el comportamiento para un día promedio de consumo.

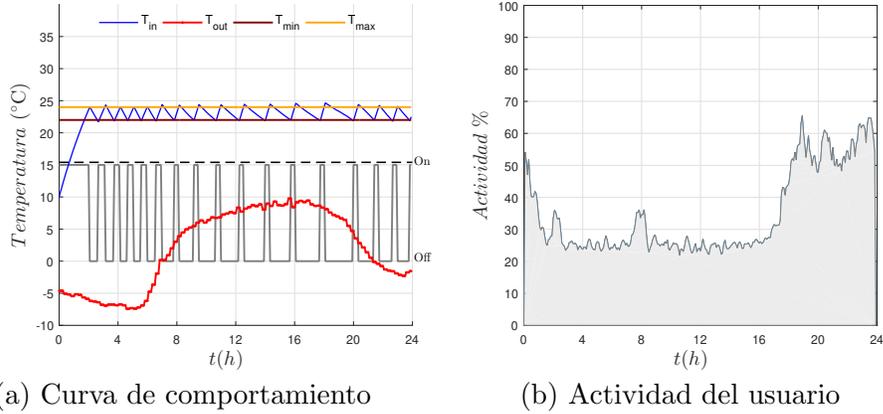


Figura 4.20: Comportamiento del calefactor eléctrico con nivel de tolerancia permitido.

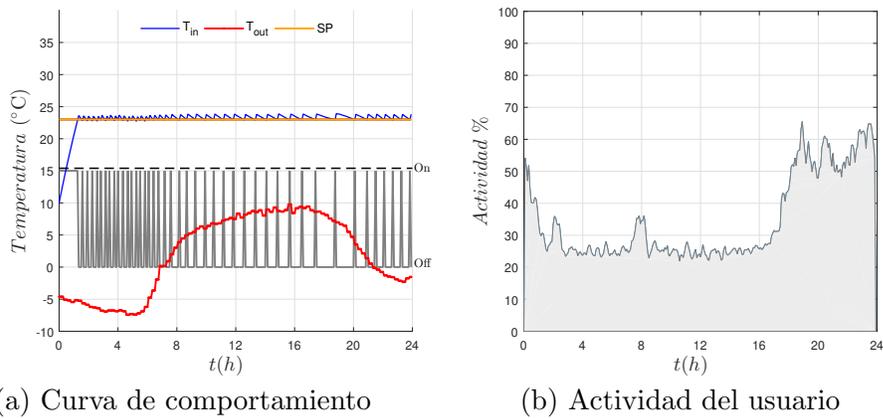


Figura 4.21: Comportamiento del calefactor eléctrico sin nivel de tolerancia permitido.

Los escenarios antes simulados muestran únicamente el consumo individual de cada carga residencial empleada, siendo activadas durante un intervalo operativo de 1 hora, a excepción del aire acondicionado y de la calefacción los cuales operaron continuamente dependiendo del valor de temperatura deseado. Sin embargo, en una aplicación real este consumo depende directamente de la utilidad que el usuario le dé al electrodoméstico según sean sus necesidades.

En efecto, para un mejor análisis de la demanda energética durante el día, se simuló un escenario en el cual cada carga es operada para diferentes intervalos horarios, con la finalidad de poder obtener un comportamiento de consumo más real. Para ello se establecieron los intervalos de activación simulada de la Tabla 4.5 para cada carga. Por último, se modeló el consumo acumulado por hora del día y acumulado total empleando las siguientes dos ecuaciones:

$$P_{cons}(t) = \sum_{e \in A} P_{i_e}(t) \quad (4.12)$$

$$Pa^{tot}(t) = Pa^{tot}(t-1) + \Delta t \left[\sum_{e \in A} Pt_e(t) \right] \quad (4.13)$$

En ambas ecuaciones 4.12 y 4.13 $P_{cons}(t)$ y $Pa^{tot}(t)$ representan la potencia instantánea total y la potencia acumulada total al sumar los consumos de todas las cargas; por último, Δt define el tamaño del paso para un periodo de tiempo t .

Tabla 4.5: *Intervalos operativos simulados para cargas residenciales [125]*

Carga e	ee	sr	ml	lp	ba	ca	ac
Activación	07:00-08:00				04:00-04:30		
	13:00-15:00	15:00-16:00	13:00-14:00	09:00-09:30	10:00-11:00	05:00-06:30	00:00-24:00
	19:00-20:00			15:00-15:30	14:00-14:30	20:00-21:30	
					20:00-21:30		

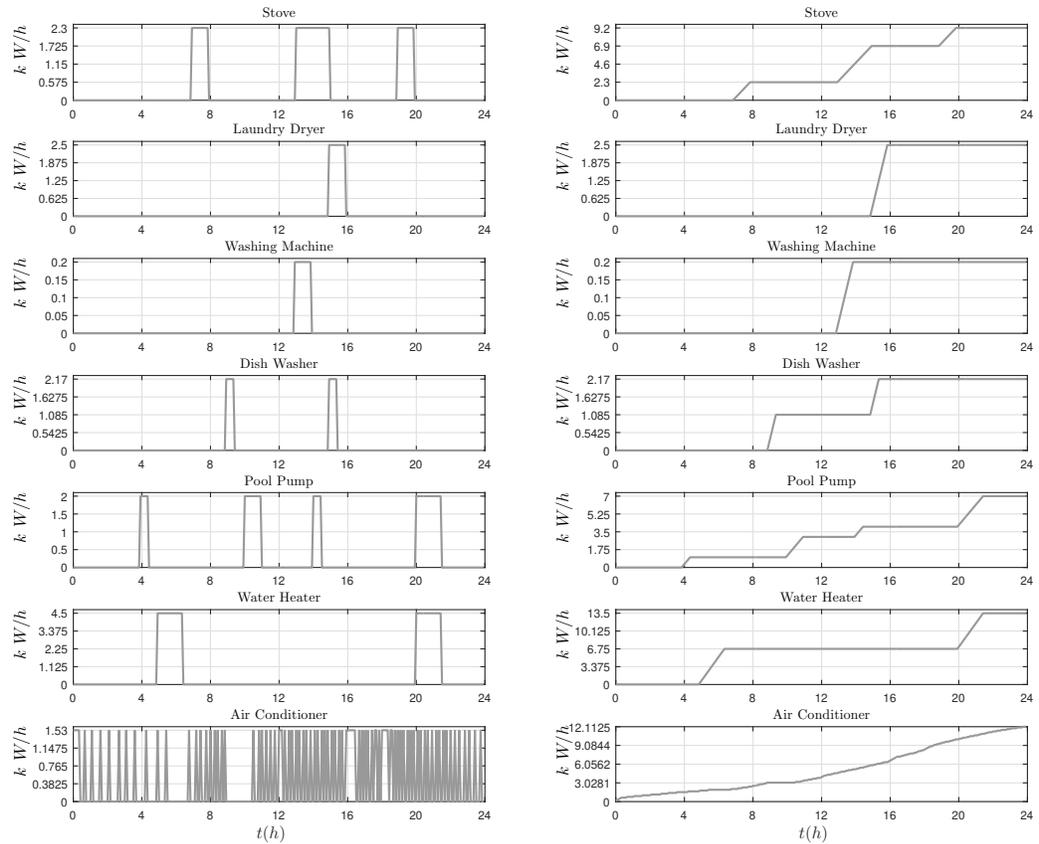


Figura 4.22: Comportamiento operativo de cargas residenciales mostrando la utilidad y la demanda acumulada dada en [kWh] para cada carga residencial durante los intervalos de activación predefinidos en la Tabla 4.5.

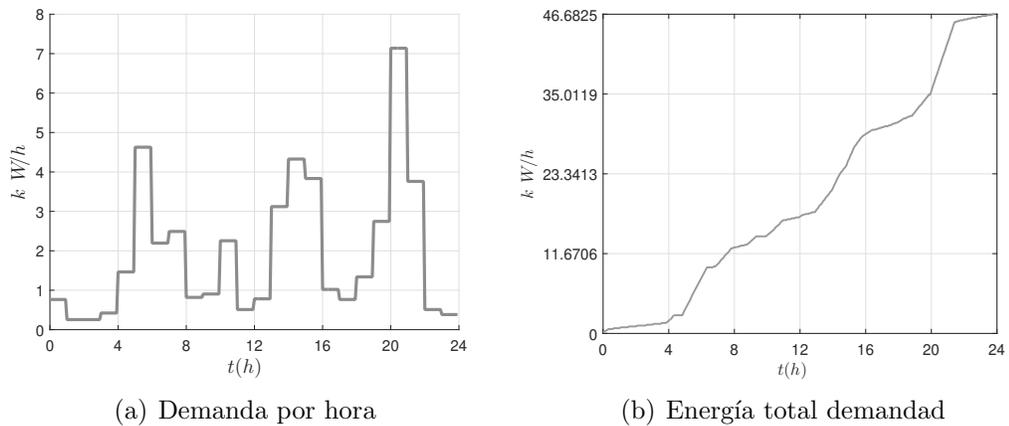


Figura 4.23: Demanda Energética dada en [kWh].

Aquí la Figura 4.23a muestra la demanda energética al activar cada una de las cargas residenciales durante diferentes periodos de tiempo, simulando un día de consumo en el hogar, donde la Figura 4.23b representa una curva acumulativa de energía durante cada hora del día.

4.5. Unidad de Almacenamiento

Modelo Operativo

La inclusión de unidades de almacenamiento surge de la necesidad de tener un mejor aprovechamiento de la Nano Red y lograr una mayor independencia del sistema eléctrico principal. Aquí surgen dos posibles casos, el primero viene dado en los periodos en los que la demanda energética se encuentra muy por debajo del nivel de generación, es decir, la energía producida de más en la Nano Red de no estarse aprovechando o redistribuyendo se está desperdiciando. El segundo caso plantea un escenario en el que la demanda energética está por encima del nivel de generación, por lo que la demanda excedente se deberá cubrir con energía proveniente del sistema principal en el caso de las redes no autónomas, y para el caso de las Nano Redes autónomas algunas cargas se quedarán sin suministro eléctrico.

En este sentido, las unidades de almacenamiento pueden ser modeladas para operar en función a un proceso de carga o descarga que se basa en permitir la carga de las unidades en los periodos donde existe un excedente de producción energética y descargarlas en los periodos en los que los niveles de demanda se encuentran por encima de los niveles de generación de la Nano Red.

Por otra parte, en [123] se explica que bajo condiciones no ideales es importante considerar los límites operativos que poseen las baterías. Debido a esto, a continuación se presentan algunos factores que se consideraron importantes para aproximar el comportamiento de una unidad con dispositivos de almacenamiento:

- Capacidad de carga: representa la capacidad de almacenamiento de la batería estableciendo un límite máximo de carga.
- Profundidad de descarga: ya que los ciclos de descarga profunda afectan significativamente la vida útil de las unidades de almacenamiento, se establece un factor que limita la descarga absoluta de la batería, y se puede estimar usando la Ecuación 4.14 tomada de [123].

$$P_{min} = P_{max}(1 - DOD) \quad (4.14)$$

Donde P_{max} representa la máxima cantidad de energía que puede ser almacenada, DOD la profundidad de la descarga, y P_{min} la máxima descarga permitida en la unidad.

- Tasa de carga y descarga: debido a que una batería no puede almacenar o aportar instantáneamente la totalidad de la energía que esta requiere o contiene respectivamente, se define un termino que representa la cantidad de energía que puede registrar o suministrar la unidad durante un intervalo de tiempo. En este sentido, este factor dependera directamente del tiempo de carga y descarga y de la capacidad máxima de la batería.
- Eficiencia de carga y descarga: debido a propiedades fisicas de la batería ya sea por el material en que esta fabricada, su diseño funcional o desgaste fisico, aparece un parametro que define el porcentaje de energía que podrá almacenar o aportar la unidad de almacenamiento durante los periodos de carga o descargar respectivamente.
- Factor de autodescarga: debido a perdidas en las unidades de almacenamiento es difícil mantener por tiempo indefinido un valor constante de energía, por lo que el factor de autodescarga representa las perdidas en la batería durante los periodos que se encuentra la unidad en reposo.

En este sentido, en la Ecuación 4.15 se describe el modelo de unidad de almacenamiento propuesto, este incluye las restricciones para los periodos de carga y descarga, manteniendo el estado de la carga dentro de los limites operativos que se establezcan. A su vez, se considera la disponibilidad en la Nano Red y las perdidas en el sistema. Por otra parte, se incluyen variables de estado que definen la activación de la carga o la descarga de la unidad en función de la disponibilidad y de la demanda energética respectivamente.

$$S_e(t) = \begin{cases} 1, & \text{Sí } P_{ng}(t) > P_{cons}(t) , e = stc \\ 0, & \text{Sí } P_{ng}(t) < P_{cons}(t) , e = stc \\ 1, & \text{Sí } P_{cons}(t) > P_{ng}(t) , e = std \\ 0, & \text{Sí } P_{cons}(t) < P_{ng}(t) , e = std \end{cases}$$

$$s.a \begin{cases} P_{min} < P_{soc} < P_{max}, & \forall t \in T \\ S_{stc}(t) + S_{std}(t) \leq 1, & \forall t \in T \\ P_c = \min(Pr_c(t), Pd_{ng}(t)) & \forall t \in T \\ P_d = \min(Pr_d(t), Pd_{cons}(t)) & \forall t \in T \end{cases} \quad (4.15)$$

$$P_{soc}(t+1) = P_{soc}(t)(1 - \delta) + \Delta t(\eta_c P_c S_e(t) - \frac{P_d}{\eta_d} S_e(t)) \quad \forall t \in T$$

Donde $S_e(t)$ indica el estado de la unidad de almacenamiento; P_{ng} y P_{cons} la potencia suministrada por la Nano Red y la potencia demandada por las cargas e respectivamente; P_{min} y P_{max} representan los limites de carga y descarga de la unidad de almacenamiento para todo t dentro del periodo operativo T de los electrodomésticos en uso; stc y std es la nomenclatura empleada para hacer referencia al proceso de carga y descarga; P_c , P_d la máxima potencia tomada para la carga y para la descarga de la unidad, Pr_c , Pr_d , Pd_{ng} , Pd_{cons} la tasa de carga, la tasa de descarga, la potencia excedente de la Nano Red, y la potencia demandada excedida; δ el factor de autodescarga; P_{soc} el estado de la carga estimado por unidad de tiempo t ; Δt representa el tamaño del paso; por último η_c y η_d representan la eficiencia de carga y descarga respectivamente.

Cabe resaltar que, para la misma unidad e se emplea la nomenclatura stc y std simultáneamente debido a que un proceso de carga puede verse reflejado como un incremento en el consumo eléctrico y un proceso de descarga puede verse reflejado como un incremento en la disponibilidad energética respectivamente.

Ahora, en referencia al modelo operativo, al activarse el estado de carga o descarga ya que P_{soc} se encuentra dentro de los limites operativos, dos parámetros P_c y P_d definen el proceso de la carga y la descarga respectivamente, consideran la disponibilidad y la demanda energética. P_c establece una comparativa entre la tasa de carga Pr_c y la energía excedente producida por la Nano Red Pd_{ng} , ya que, si el nivel de energía excedente está por debajo de la tasa de carga, la batería solo podrá almacenar esa cantidad de energía restante. De igual forma P_d compara la tasa de descarga Pr_d respecto al nivel de consumo excedente Pd_{cons} , ya que, si el nivel de consumo excedente

está por debajo de la tasa de descarga, la batería únicamente cubrirá ese consumo restante.

Pruebas Simuladas

La Tabla 4.6 incluye los parámetros tomados de [123] que fueron considerados para las pruebas simuladas realizadas al modelo de la Ecuación 4.15.

Tabla 4.6: *Parámetros operativos de la unidad de almacenamiento*

Pr_c	Pr_d	P_{max}	DOD
0.2 [kWh]	0.2 [kWh]	2 [KW]	60 %

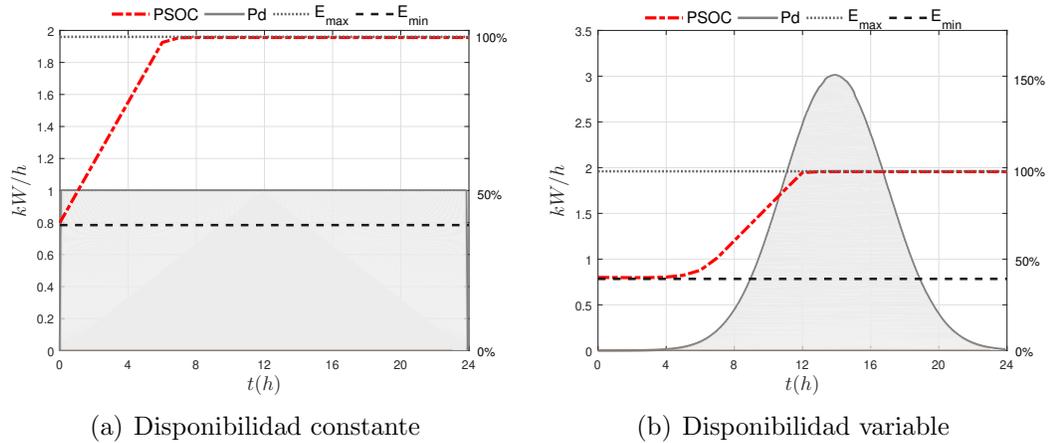


Figura 4.24: *Proceso de carga de la unidad de almacenamiento.*

Para mostrar el comportamiento de carga se establecen dos perfiles que representan un nivel de disponibilidad energético ideal, y se plantean dos escenarios. El primero mostrado en la Figura 4.24a que incluye un perfil de energía constante, y el segundo de la Figura 4.24b que incluye un perfil de energía variable. Cabe destacar que existen similitudes en los intervalos en el que la disponibilidad energética es alta, donde para ambos casos se logra almacenar el máximo de energía. Sin embargo, para el caso de la Figura 4.24b cuyo nivel de energía incrementa gradualmente a partir de cierto intervalo, la curva de carga presenta una carga gradual, debido a que el nivel inicial de energía disponible es pobre.

Para evaluar el proceso de descarga se consideró 1 carga ideal de 1.5 [kWh] de consumo constante durante un intervalo de tiempo finito. Aquí se tomaron en cuenta los perfiles de disponibilidad energética de la Figura 4.24.

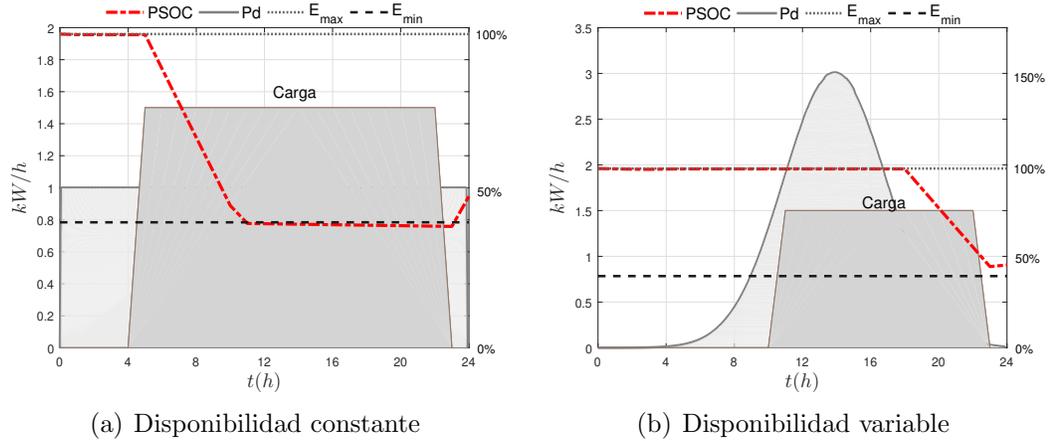


Figura 4.25: *Proceso de descarga de la unidad de almacenamiento.*

La Figura 4.25 muestra el proceso de descarga de la unidad de almacenamiento modelada. Para ambos casos al momento de activarse la descarga, esta aportará energía en función del valor P_{r_d} establecido. La Figura 4.25a para el perfil de disponibilidad energético constante, muestra que la carga está por encima de dicha disponibilidad durante todo el intervalo de consumo, por lo que inmediatamente al dispararse la demanda, la batería comienza a descargar su energía en la carga para cubrir con el consumo excedente. Por otra parte, en la Figura 4.25b la carga entra en operación durante un intervalo cuya disponibilidad de la red cubre con parte de la demanda, pero en el intervalo donde el consumo excede la disponibilidad, la batería comienza el proceso de descarga cubriendo con parte de este consumo excedente. Sin embargo, para el primer caso donde el perfil de disponibilidad energético está siempre por debajo del consumo, la unidad de almacenamiento alcanza la profundidad de descarga, por lo que se tiene como consecuencia, la desactivación de la descarga hasta que la batería no alcance un nivel de carga por encima del mínimo de energía establecido.

Para el proceso de carga/descarga se consideraron ahora 3 cargas ideales con un consumo de $1.5 [kWh]$. Aquí, se evaluó 1 escenario operativo donde se establece a su vez un valor inicial para el estado de la carga P_{soc} . En este sentido, el estado inicial de P_{soc} se estableció en un 50% y los resultados obtenidos de la prueba simulada se muestran en la Figura 4.26.

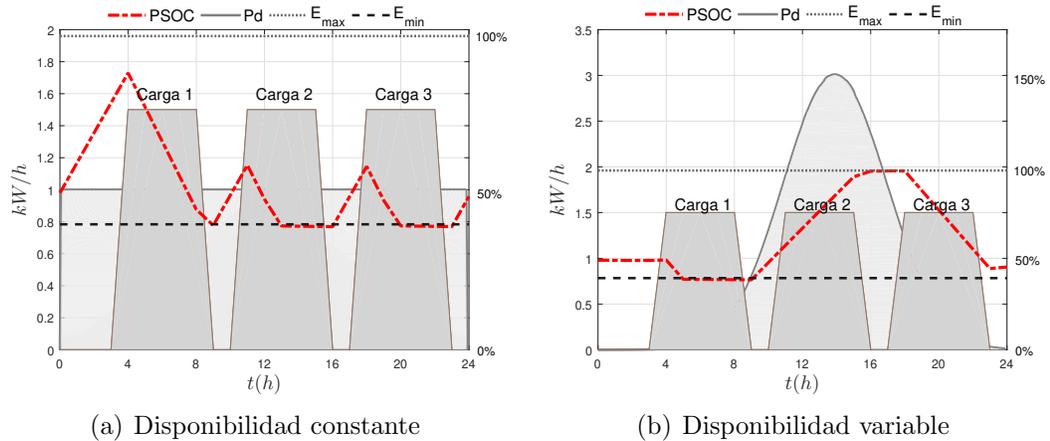


Figura 4.26: *Proceso de carga y descarga de la unidad de almacenamiento.*

La Figura 4.26a muestra que para un perfil constante donde la energía consumida está por encima de la disponibilidad energética, la unidad de almacenamiento no logró alcanzar su máxima carga, aportando poca energía y llegando rápidamente a la descarga absoluta. En la Figura 4.26b la energía contenida es descargada inicialmente para cubrir con parte de la demanda de la carga 1. Por otra parte, durante el periodo de mayor disponibilidad no se requirió de la energía de la batería ya que la red logró cubrir con la demanda absoluta de la carga 2, de igual forma, parte del excedente de energía generado por la red logra ser almacenado y utilizado posteriormente cuando la demanda supera nuevamente la disponibilidad de la red. Por último, gracias a los resultados obtenidos, el modelo propuesto resulta conveniente para ser integrado al HEMS que se plantea.

4.6. Modelo de Optimización Multiobjetivo

La implementación de un modelo de optimización multiobjetivo se establece con la finalidad de mejorar e integrar diferentes tópicos, tales como alta demanda energética, gestión desmedida de las cargas, administración de la energía en función de los diferentes precios de la electricidad, entre otros. Ahora, como se ha venido detallando, una problemática creciente respecto al incremento del consumo energético es el incremento de consumo a nivel residencial. Aquí, tanto para las empresas suministradoras de energía como para los usuarios de la red representa un problema: para las empresas suministradoras por las dificultades en términos de despacho y costos que acarrea el incremento de la demanda, y para los usuarios el incremento de su factura eléctrica. Entonces, un modelo de optimización multiobjetivo es propuesto para atacar

estos dos principales tópicos desde el lado residencial y se presenta a continuación:

$$\text{minimizar}\{f = (f_1, f_2, \dots, f_n)\} \quad (4.16)$$

Donde f hace referencia de manera generalizada a la función multiobjetivo que se busca minimizar, y f_1, f_2, \dots, f_n representan el conjunto de funciones objetivos que integran a la función f .

Sin embargo la minimización de la función multiobjetivo f esta sujeta al conjunto de restricciones operativas que se presentan seguidamente:

$$\text{s.a.} \begin{cases} \alpha_e \leq t_{ini} \leq T_e \leq t_{fin} \leq \beta_e & \forall e \in A \\ S_e = \{0, 1\} & \forall e \in A \\ \beta_e - \alpha_e \geq d_e & \forall e \notin \{ac, ce, stc, std\} \\ E_e = P_e(t)d_e & \forall e \notin \{ac, ce, stc, std\} \\ \sum_{t=\alpha_e}^{\beta_e} P_i_e(t) = E_e & \forall e \in A \end{cases} \quad (4.17)$$

Donde t_{ini} y t_{fin} representan el tiempo de encendido y el tiempo de apagado respectivamente para cada carga e . α_e y β_e definen los límites de tiempo de la ventana de operación permitida para cada carga. T_e establece el periodo operativo. A simboliza el conjunto de electrodomésticos en uso. d_e representa el tiempo de uso permitido para la carga e . S_e indica el estado de actividad del electrodoméstico. $P_e(t)$ figura el nivel de potencia demandada por la carga e por hora de uso. Por último, E_e hace referencia al nivel de energía disponible para cada carga.

Dos funciones objetivos son planteadas para la solución del problema de optimización. La primera definida por la Ecuación 4.18, la cuál evalúa el costo que representa la utilidad de las distintas unidades e durante un periodo total de tiempo T , y la segunda definida por la Ecuación 4.19, la cuál evalúa el consumo energético para cada unidad e seleccionada durante un periodo total de tiempo T .

$$f_1 = \sum_{t \in T} \left[\underbrace{\sum_{e \notin \{wm, pv, std\}} P_e(t)S_e(t)}_{\text{demanda}} - \underbrace{\sum_{e \in \{wm, pv, std\}} P_e(t)S_e(t)}_{\text{disponibilidad}} \right] \quad (4.18)$$

$$f_2 = \sum_{t \in T} \left[\underbrace{\sum_{e \notin \{wm, pv, std\}} cde(t)P_e(t)S_e(t)}_{\text{demanda}} - \underbrace{\sum_{e \in \{wm, pv, std\}} cde(t)P_e(t)S_e(t)}_{\text{disponibilidad}} \right] \quad (4.19)$$

Donde cde representa el costo de la energía para el instante de tiempo t , P_e la potencia demandada por la carga e y S_e el estado operativo para la carga e .

4.6.1. Modelo Multiobjetivo en base a Pesos

La Ecuación 4.20 hace referencia a la adición de las funciones objetivo individuales. Sin embargo, fue necesario la inclusión de dos pesos w_1 y w_2 y el escalamiento del problema a través de c_1 y c_2 para permitir la minimización simultanea de ambas funciones.

$$f = \min(w_1 f_1 c_1 + w_2 f_2 c_2) \quad (4.20)$$

$$c_1 = 1, \quad c_2 = a/b \quad (4.21)$$

donde c_1 y c_2 son multiplicadores escalares que asocian el costo y el consumo energético conjuntamente. Estos multiplicadores fueron calculados mediante la evaluación individual de las funciones objetivo 4.18 y 4.19, para obtener así, un término a dado en $[kWh]$ para el consumo y un término b dado en \$ para el costo, permitiendo construir los multiplicadores tal como se presenta en 5.1, para convertir la función multiobjetivo en una función escalar dada en $[kWh]$.

4.6.2. Modelo Multiobjetivo en base a Frente de Pareto

El problema multiobjetivo que se plantea puede ser representado de tal forma que puede ser resuelto a través de la construcción de un frente de Pareto-óptimo. En este sentido, la evaluación por frente de Pareto elimina la necesidad de establecer pesos y constantes de escalamiento o normalización para la resolución de los diferentes objetivos planteados. Esto se debe gracias a que, la construcción del frente de Pareto se hace mediante la comparativa punto a punto de cada objetivo de los vectores que contienen las soluciones que cumplen con las restricciones. De este modo, la función objetivo f puede ser representada de tal manera como se presenta a continuación:

$$f = \min [f_1, f_2] \quad (4.22)$$

siendo f un vector que contiene cada uno de los objetivos a evaluar.

Prueba Simulada

A fin de probar y calibrar el GA que integra la evaluación por frente de Pareto, se plantea un problema matemático multi-objetivo con restricciones ajeno al que se presenta en la sección 4.6, esto con la finalidad de ejemplificar la funcionabilidad del frente de Pareto que se aplica en este trabajo. Dicho esto, se presenta el caso de estudio.

Para ello se desea encontrar el frente de Pareto para minimizar la función multiobjetivo f tomada de 4.23 la cual está sujeta a las restricciones 4.24.

$$\begin{aligned}
 f &= \min [f_1(x), f_2(x)] \quad x \in \mathbf{R}^2 \\
 f_1(x) &= 2\rho h x_2(1 + x_1^2) \\
 f_2(x) &= (Ph(1 + x_1^2)^{1,5}(1 + x_1^4)^{0,5}) / (2Ex_1^2x_2\sqrt{2}) \\
 x &= (x_1, x_2)
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

$$\text{s.a.} \begin{cases} g_1 = ((P(1 + x_1)(1 + x_1^2)^{0,5}) / (2x_1x_2\sqrt{2})) - \sigma \leq 0 \\ g_2 = ((P(1 - x_1)(1 + x_1^2)^{0,5}) / (2x_1x_2\sqrt{2})) - \sigma \leq 0 \\ 0,1 \leq x_1 \leq 2,25 \\ 0,5 \leq x_2 \leq 2,5 \end{cases} \tag{4.24}$$

donde g_1 y g_2 representan las restricciones a las que está sujeto el problema multiobjetivo, los parámetros E , ρ , h , P y σ representan elementos que describen la dinámica del problema planteado y x_1 y x_2 los puntos para cada objetivo dentro del espacio de búsqueda.

Por otra parte, el GA es el algoritmo metaheurístico seleccionado para la resolución de los problemas que se plantean en este trabajo y este operará bajo los criterios definidos en la sección 3.4. De esta manera, los parámetros de ajuste definidos para la utilidad del GA se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.7: *Parámetros de ajuste del GA*

Parámetros del GA	Valor
Iteraciones	50
Población	26
Probabilidad de cruce Pc	95 %
Probabilidad de mutación Pm	5 %
Tipo de Selección	Torneo
Tipo de Cruce	Uniforme
Tipo de Mutación	De gen completo

Ahora bien, se procede a integrar los objetivos y las restricciones formuladas en las Ecuaciones (4.23) y (4.24) al GA para su evaluación. Entonces, los resultados obtenidos se presentan a continuación:

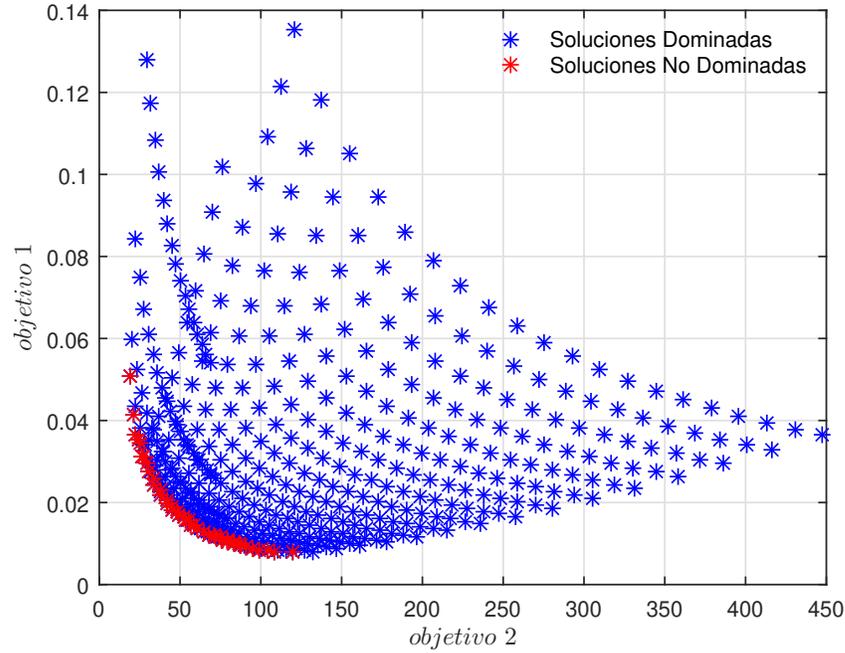


Figura 4.27: Construcción del frente de Pareto-óptimo.

La Figura 4.27 presenta el resultado de la multievaluación obtenida por parte del GA para la resolución del problema (4.23) descrito. En este sentido, los puntos azules representan la población de soluciones que satisfacen todas las restricciones. Sin embargo, estas soluciones según el criterio de optimalidad y de dominancia definidos en la sección 3.6.2, pasan a ser soluciones dominadas, las cuales no se consideran como candidatas a representar una solución óptima para resolver el problema multiobjetivo (4.23). Por otra parte, los puntos rojos representan un conjunto de solución óptimas las cuales forman el frente de Pareto-óptimo. Por su parte, las soluciones presentes en el frente de Pareto constituyen soluciones no dominadas de la población, es decir, cada una de ellas representa una buena solución para la resolución del problema. Asimismo, la selección de la solución del frente de Pareto que mejor se adapte al problema puede depender de algún criterio definido durante su programación.

Dicho esto, la construcción del frente de Pareto para resolver el problema de energía residencial (4.16) que se plantea en esta sección, resultaría conveniente debido a que este representa un problema multiobjetivo común a niveles residenciales.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Consideraciones Generales

En vista de la necesidad de implementar un sistema que permitiera un mayor ahorro tanto económico como energético a los usuarios residenciales se propuso un HEMS que incluyó un optimizador basado en un GA multiobjetivo. En efecto, el HEMS propuesto explota la capacidad de aprendizaje evolutivo de los GAs para optimizar la gestión de los electrodomésticos presentados en la sección 4.4. Por su parte, el HEMS para administrar de manera eficiente las cargas residenciales evalúa las tarifas fijadas por la empresa suministradora de energía, la disponibilidad energética de la Nano Red doméstica que se plantea en la sección 4.1 y el estado de la carga de la unidad de almacenamiento propuesta en la sección 4.5 con el objetivo de garantizar el máximo aprovechamiento de la Nano Red y la autonomía del sistema eléctrico residencial, permitiendo a su vez, una menor dependencia del sistema eléctrico principal. En este sentido, el HEMS permitió resolver dos factores importantes dentro de los problemas de gestión energética como lo son la alta demanda y el alto costo por consumo energético.

Por otra parte, la eficiencia de los GAs depende directamente de los valores que se le sea asignado a cada uno de los operadores genéticos indicados en la sección 3.4. En este sentido, los valores asignados para los operadores del GA fueron considerados en base a la experiencia y a los resultados experimentales presentados en los trabajos [110–112]. Por su parte, estos se exponen en la Tabla mostrada en la sección 4.6.2 donde se describen los parámetros de ajustes establecidos para el optimizador basado en GA integrado al sistema de gestión residencial propuesto.

También es importante agregar que tal como se mencionó previamente, una de las consideraciones para la gestión de los electrodomésticos es la tarifa fijada por la empresa suministradora de energía. Dicho esto, se consideraron tarifas de cobro reales

tomadas de [126] para todos los casos de estudio presentados en las secciones de este capítulo de resultados. Aquí, la empresa suministradora de energía establece un sistema de tarifas del tipo TOU cuyos intervalos de cobro son fijados de acuerdo a la temporada del año, tal como se muestra en la Figura 5.1.



Figura 5.1: Intervalos de Cobro.

Del mismo modo, la Tabla 5.1 muestra los costos establecidos por la empresa canadiense para la temporada verano de junio-agosto del 2017. Sin embargo, cabe destacar que solo por fines de practicidad se establecieron los mismos costos para las pruebas que simulaban una temporada de invierno en la sección 5.3.

Tabla 5.1: Tarifas TOU

Tarifas	Costo C\$
Bajo (Off - Peak)	0.0620
Medio (Mid - Peak)	0.0920
Alto (On - Peak)	0.1080

Por otro lado, es importante destacar que, la función multi-objetivo (4.20) descrita en la sección 4.6, se emplea como función objetivo en todos los casos de estudios presentados como resultados en esta sección, a excepción del caso de estudio presentado en la sección 5.6, donde se emplea la técnica por construcción de frente de Pareto para la resolución de problemas multi-objetivos, tal como se presenta este trabajo.

Por último, existen consideraciones particulares dentro de cada caso de estudio presentado en este capítulo. Sin embargo, estas se presentan en la sección que

corresponde a su uso.

5.2. Validación del HEMS

El HEMS que se propone permite la integración de cada uno de los modelos presentados en el capítulo anterior. Sin embargo, la validación del comportamiento del sistema es importante para garantizar el funcionamiento adecuado de la herramienta. Para ello se compara el comportamiento del HEMS con una herramienta comercial desarrollada para la simulación de cargas residenciales inteligentes (*Smart Residential Load Simulator*), por sus siglas en inglés, SRLS). El SRLS se presenta en [127] con la finalidad de ofrecer una herramienta capaz de simular el uso de diferentes electrodomésticos comúnmente presentes en nuestros hogares, permitiendo conocer al usuario residencial un estimado de su nivel de consumo y la factura diaria a pagar por $[kWh]$ consumido.

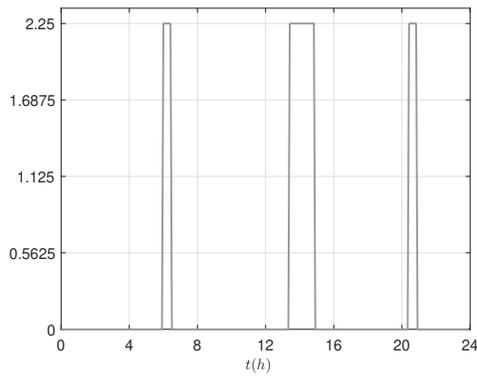
A continuación, la tabla 5.2 presenta las condiciones operativas establecidas para el HEMS y el SRLS respectivamente, dichos horarios se fijaron en base a los hábitos de consumo de un usuario promedio [125].

Tabla 5.2: *Intervalos operativos para las cargas residenciales*

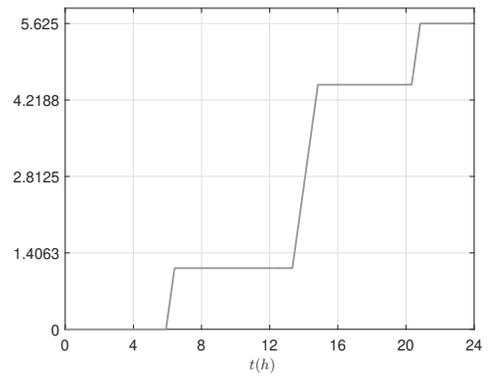
cargas e	Intervalo 1 (h)	Intervalo 2 (h)	Intervalo 3 (h)
	$\alpha_e - \beta_e$	$\alpha_e - \beta_e$	$\alpha_e - \beta_e$
ee	06:00-06:30	13:30-15:00	20:30-21:00
sr	15:00-16:00	-	-
ml	08:00-09:30	-	-
lp	12:00-13:00	21:00-22:00	-
ba	03:00-04:00	09:00-10:00	19:00-20:00

Para la validación se establece el mismo uso de algunos electrodomésticos en el HEMS y en el SRLS, esto con la finalidad de comprobar el comportamiento operativo de cada una de las cargas residenciales seleccionadas. Por su parte, la tabla 5.2 presenta las condiciones operativas establecidas para las cargas, siendo $\alpha_e - \beta_e$ los intervalos de activación de los electrodomésticos y d_e el tiempo máximo de uso que se le dará a la carga.

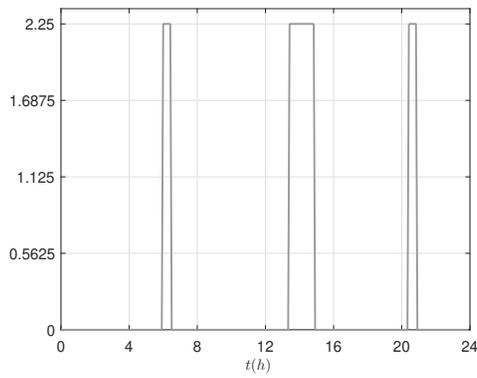
Los resultados simulados obtenidos del HEMS y del SRLS al ser sometidos bajo las condiciones operativas de la tabla 5.2 se presentan a continuación:



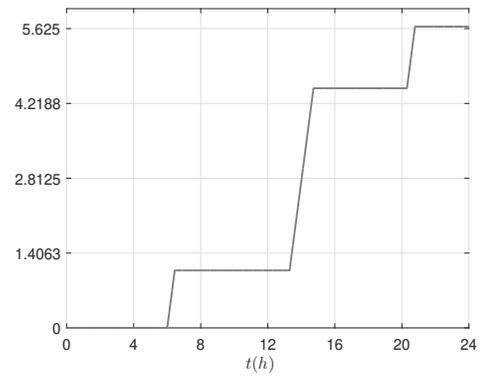
(a) Utilidad en el HEMS



(b) Consumo en el HEMS

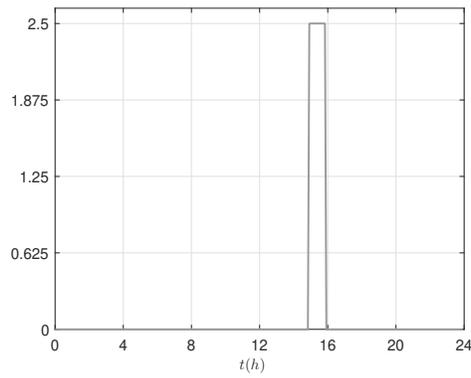


(c) Utilidad en el SRLS

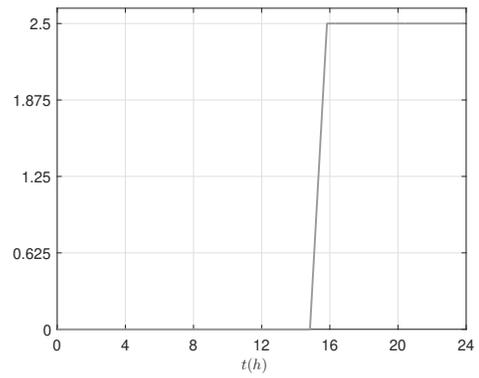


(d) Consumo en el SRLS

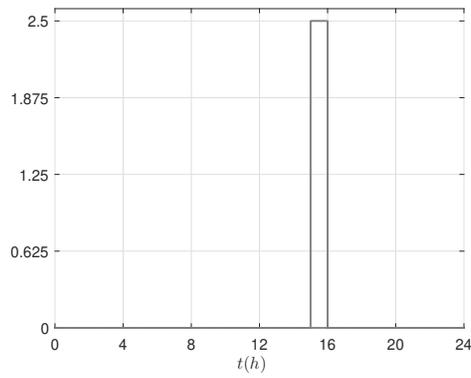
Figura 5.2: Validación del funcionamiento operativo de estufa eléctrica en (kW/h).



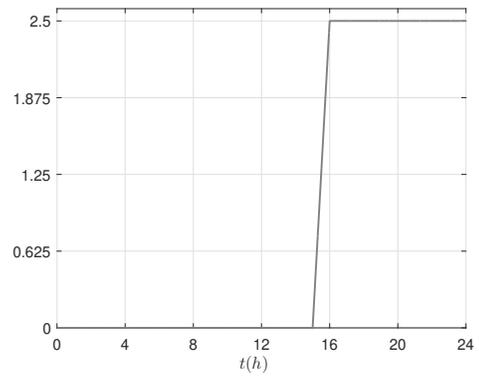
(a) Utilidad en el HEMS



(b) Consumo en el HEMS

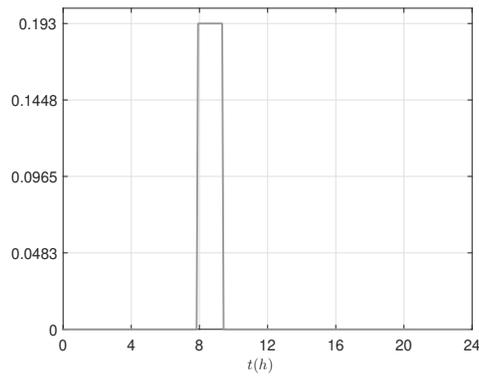


(c) Utilidad en el SRLS

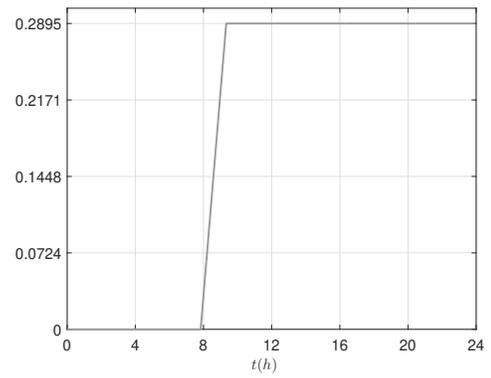


(d) Consumo en el SRLS

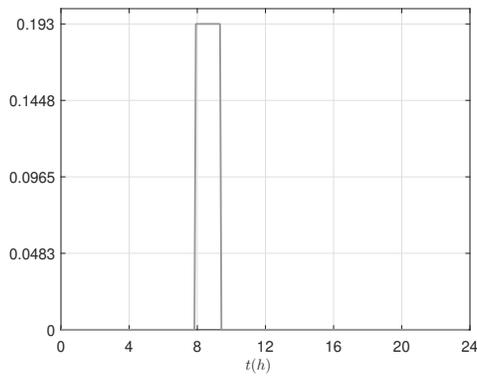
Figura 5.3: Validación del funcionamiento operativo de la secadora eléctrica en (kW/h).



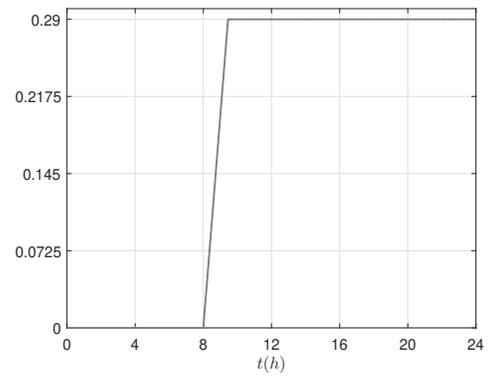
(a) Utilidad en el HEMS



(b) Consumo en el HEMS

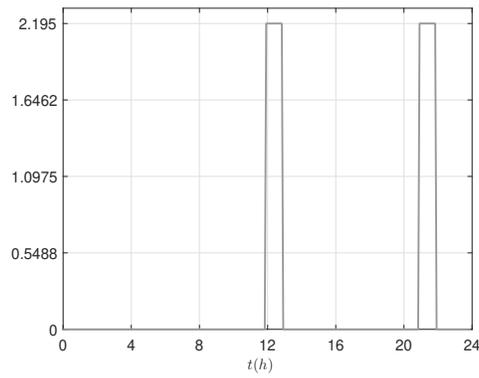


(c) Utilidad en el SRLS

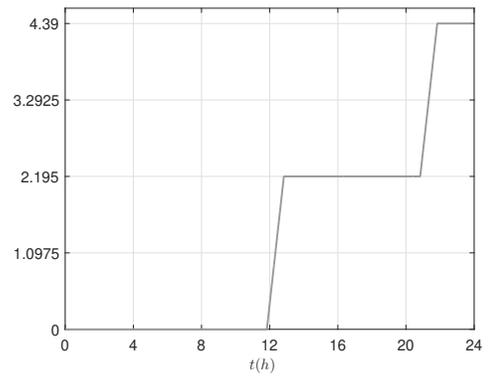


(d) Consumo en el SRLS

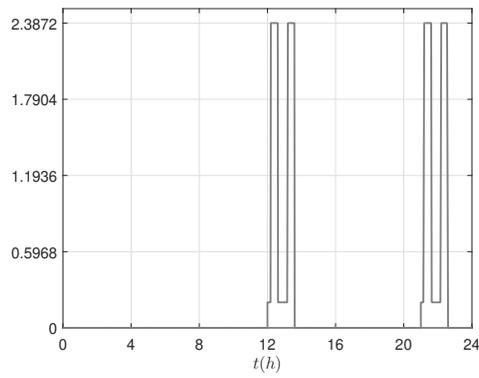
Figura 5.4: Validación del funcionamiento operativo de la máquina de lavado en (kW/h).



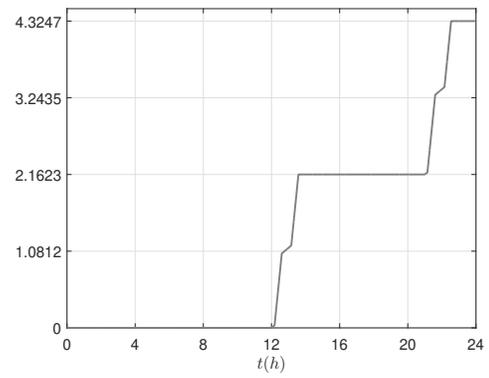
(a) Utilidad en el HEMS



(b) Consumo en el HEMS

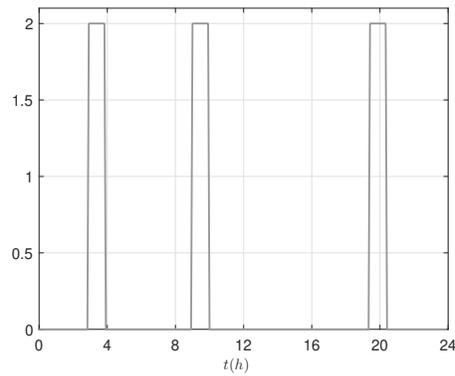


(c) Utilidad en el SRLS

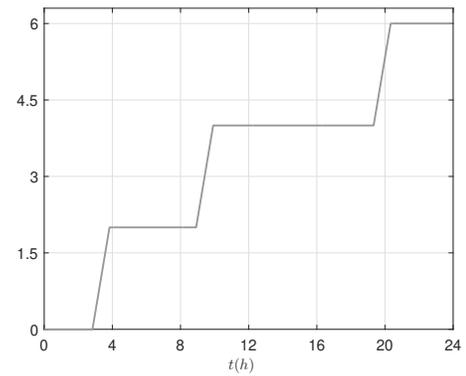


(d) Consumo en el SRLS

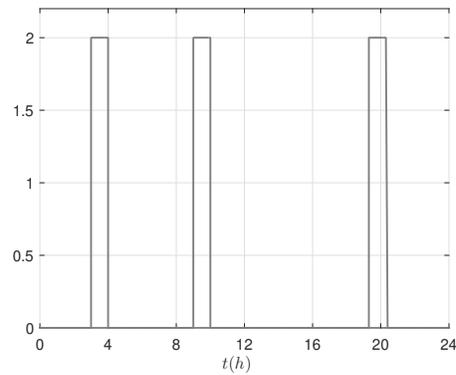
Figura 5.5: Validación del funcionamiento operativo del lavaplatos en (kW/h).



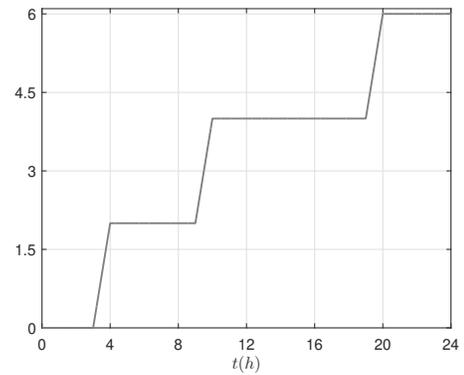
(a) Utilidad en el HEMS



(b) Consumo en el HEMS



(c) Utilidad en el SRLS



(d) Consumo en el SRLS

Figura 5.6: Validación del funcionamiento operativo de la bomba de agua en (kW/h).

Las Figuras 5.2-5.6 obtenidas de las pruebas simuladas para la validación se presentaron de tal forma que permitiesen establecer una comparativa entre el comportamiento de cada carga en el HEMS y en el SRLS respectivamente. De este modo, se muestra el estado de cada carga y el valor de energía total demandada durante un día de uso. Sin embargo, el objetivo del presente trabajo no fue el de describir fielmente los modelos empleados en el SRLS, sino más bien establecer modelos que presentaran un comportamiento aproximado de estas. En este sentido, el estado operativo del lavaplatos mostrado en la Figura 5.5a describe un comportamiento un tanto diferente al de la Figura 5.5c, esto se debe a la dinámica del modelo que define el sistema SRLS, lo que ocasionó una pequeña desviación en el nivel de energía consumida por dicho electrodoméstico. Por otra parte, las demás cargas residenciales presentan el mismo comportamiento por lo que su nivel de energía demandada durante un día operativo fue el mismo.

La Figura 5.7 muestra el total de energía demanda por todas las cargas durante las pruebas simuladas realizadas con el HEMS y el SRLS para un día de consumo.

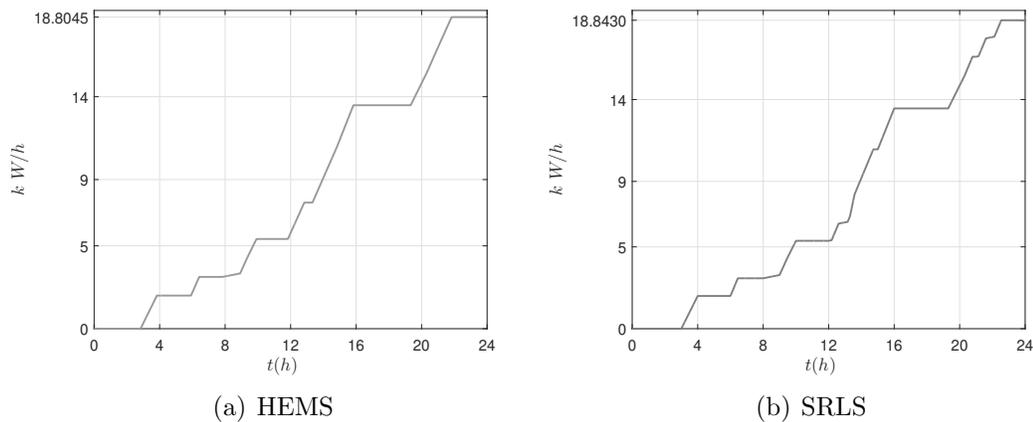


Figura 5.7: Demanda total de energía obtenida de las pruebas simuladas del HEMS y del SRLS.

Analizando los resultados mostrados en la Figura 5.7, es importante mencionar que, para el HEMS, el nivel de energía demandada por todas las cargas residenciales durante un día habitual de consumo presentó una diferencia de 0.21% respecto al nivel total de energía demandada por las cargas residenciales del SRLS. Esta pequeña desviación se originó debido a las dinámicas presentadas en el modelo del lavaplatos del SRLS. Sin embargo, dicha diferencia es pequeña, por lo que se puede considerar como apropiado el comportamiento de todos los electrodomésticos en el HEMS respecto al nivel total de energía demandada durante el día operativo de estas.

La Tabla 5.3 expone de manera numérica los resultados obtenidos del SRLS

y del HEMS durante las pruebas simuladas y esta se presenta a continuación:

Tabla 5.3: *Comparativa de consumo y costo obtenido del SRLS y del HEMS*

Nivel de Costo	Consumo [kWh] SRLS	Consumo [kWh] HEMS	Costo C\$ SRLS	Costo C\$ HEMS
Bajo (<i>Off - Peak</i>)	8.4661	8.4450	0.5249	0.5236
Medio (<i>Mid - Peak</i>)	2.2900	2.2895	0.2106	0.2106
Alto (<i>On - Peak</i>)	8.0869	8.0700	0.8734	0.8716
Total	18.8430	18.8040	1.6089	1.6058

Respecto a los resultados presentados en la tabla 5.3, se observa una pequeña diferencia en los niveles de consumo durante los intervalos off-peak y on-peak. Sin embargo, es importante mencionar que, durante estos intervalos se encontró operando el lavaplatos, y resaltando que el modelo presentado en el SRLS posee una dinámica un tanto diferente al modelo presentado en el HEMS, conllevó a una pequeña desviación de los resultados obtenidos entre el SRLS y el HEMS durante dichos intervalos. Por otra parte, las demás cargas presentan un comportamiento similar respecto a la energía demandada tanto en el HEMS como en el SRLS, por lo que durante el intervalo del mid-peak, donde no operó el lavaplatos, se presentó el mismo nivel de consumo tanto en el HEMS como en el SRLS respectivamente. En este sentido, a pesar de que el lavaplatos del SRLS presenta un comportamiento operativo distinto al propuesto en el HEMS, la aproximación realizada respecto al nivel de consumo de dicha carga es bastante similar. Por lo que se pueden considerar como apropiados los modelos de electrodomésticos integrados al HEMS propuesto.

5.3. Ventanas Operativas

Para probar el potencial del HEMS propuesto, se establecieron rangos más amplios para los horarios operativos permitidos para cada carga residencial considerada, dichos rangos fueron denominados ventanas operativas. La finalidad de estas ventanas es la de establecer un rango de holgura en el que el electrodoméstico puede operar durante el día, dichas ventanas operativas son establecidas según sean los requerimientos del usuario.

Para el caso de estudio de las ventanas operativas, la Tabla 5.4 muestra los intervalos $\alpha_e - \beta_e$ en los que se permite la activación de cada carga, con un máximo tiempo de operación d_e durante cada intervalo definido por el usuario.

Tabla 5.4: Ventanas operativas

cargas e	Ventana 1 (h)	Uso (min)	Ventana 2 (h)	Uso (min)	Ventana 3 (h)	Uso (min)
	$\alpha_e - \beta_e$	d_e	$\alpha_e - \beta_e$	d_e	$\alpha_e - \beta_e$	d_e
ee	06:00-09:00	30	13:30-16:00	90	20:30-23:00	30
sr	07:00-20:00	60	-	-	-	-
ml	01:00-6:55	90	-	-	-	-
lp	12:00-15:00	60	21:00-24:00	60	-	-
ba	03:00-08:00	60	09:00-17:00	60	22:00-24:00	60

Ya presentada la Tabla 5.4 con las ventanas operativas establecidas para cada carga residencial, se procede a mostrar los resultados obtenidos de las pruebas simuladas.

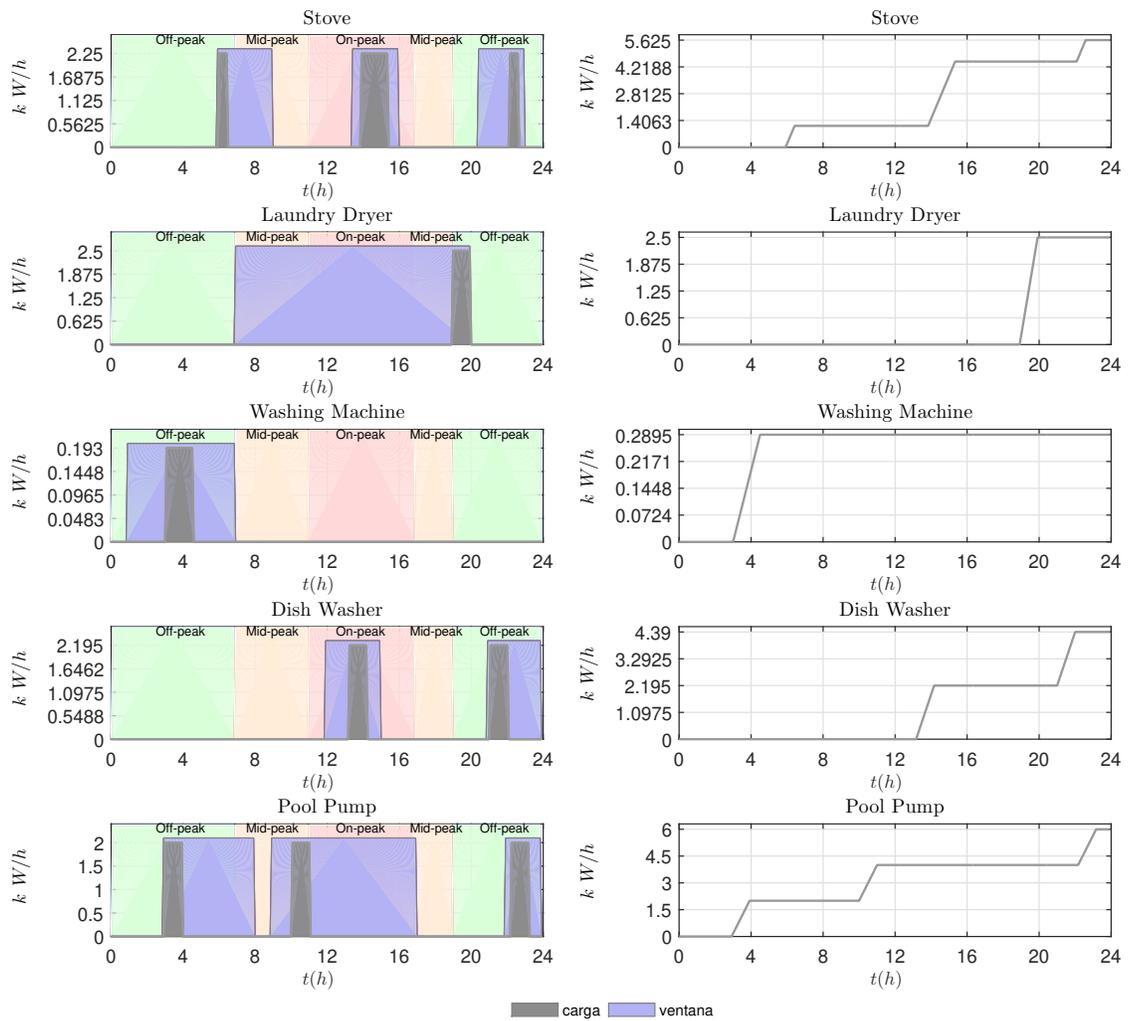


Figura 5.8: Estado operativo de las cargas empleando ventanas operativas.

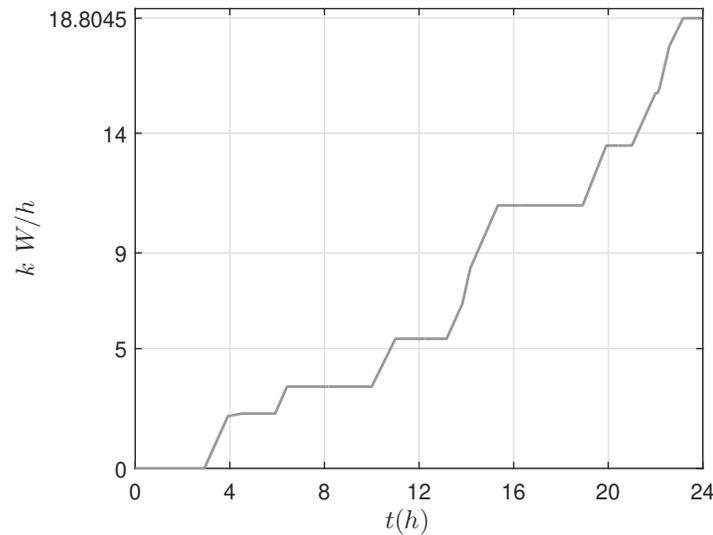


Figura 5.9: *Potencia total demandada.*

En cuanto a los resultados presentados en la Figura 5.8, se deduce que, agregar las ventanas operativas permitió al optimizador del HEMS tomar decisiones sobre el uso que se considera apropiado para los electrodomésticos de la residencia, estableciendo la combinación operativa de las cargas que mejores beneficios económicos trae al usuario de la red. Por otro lado, la Figura 5.9 muestra el nivel total de energía consumida por las cargas durante el día, aquí es importante resaltar que, la demanda total de energía fue igual que la energía total demandada que se muestra en la Figura 5.7a, esto se debe a que los periodos de uso que se les asignaron a las cargas en este caso de estudio, fueron los mismos establecidos que para el caso en el que no se consideran las ventanas operativas. De esta manera, se demuestra que al darle un uso a las cargas que considere los niveles de tarifas establecidos por el proveedor de electricidad, no es necesario disminuir el nivel de consumo para reducir la factura por consumo eléctrico en la residencia.

Por otra parte, en la Tabla 5.5 se presentan los resultados numéricos de las pruebas simuladas, estableciendo una comparativa de los resultados obtenidos al no emplear las ventanas operativas versus los resultados obtenidos al emplear las ventanas de holgura operativa.

Tabla 5.5: Comparativa de utilidad de los electrodomésticos con y sin ventanas operativas integradas al optimizador en el HEMS propuesto.

Nivel de Costo	Consumo [kWh] (sin ventana)	Consumo [kWh] (con ventana)	Costo C\$ (sin ventana)	Costo C\$ (con ventana)	Ahorro respecto a la factura %
Baja (<i>Off – Peak</i>)	8.4450	11.234	0.4662	0.6965	-49.3993
Media (<i>Mid – Peak</i>)	2.2895	1.8333	0.3008	0.1687	43.9162
Alto (<i>On – Peak</i>)	8.0700	5.7367	0.8810	0.6196	29.6708
Total	18.8045	18.8045	1.6475	1.4848	9.8755

Al usuario establecer una ventana de holgura operativa para determinado electrodoméstico, este establece un nivel de permiso para que el optimizador pueda decidir que momentos son los más convenientes para utilizar la carga residencial, evaluando los diferentes niveles de costos en los que esta puede operar. Entonces, si el usuario establece para un determinado electrodoméstico una ventana operativa que abarque parte de los tres niveles de costo establecidos, el optimizador muy probablemente considerará el Off-Peak como el intervalo de uso más conveniente para emplear la carga residencial. En este sentido, en la Tabla 5.5 quien presenta una comparativa de los resultados numéricos obtenidos, muestra una disminución de demanda energética del 19.92 % durante el nivel de costo Mid-Peak y del 28.91 % durante el nivel de costo On-Peak, resaltando que durante estos intervalos los costos de la energía son más elevados. Por otra parte, se puede apreciar un incremento del 33.02 % de demanda energética durante el nivel de cobro Off-Peak, es decir, gran parte de la demanda se distribuyó durante los intervalos de menor cobro por [kWh] consumido. Ahora bien, es importante mencionar que el nivel de demanda energética total fue el mismo. Sin embargo, se presentó un ahorro económico del 9.87 % en la factura total de cobro para un día al emplear las ventanas operativas, por lo que resulta muy conveniente para el usuario final, en términos económicos, emplear este tipo de ventanas.

5.4. Gestión de Modelos Dinámicos

En este caso de estudio se presenta la gestión inteligente del aire acondicionado y de la calefacción eléctrica. Se prueba el rendimiento del optimizador garantizando el uso moderado de las unidades reguladoras de temperatura sin comprometer el confort del usuario, con la finalidad de demostrar que al emplear una metodología heurística se puede reducir considerablemente el nivel de consumo de estos electrodomésticos, cambiando el control de temperatura on/off convencional, a un control inteligente establecido por el optimizador basado en GA del HEMS.

La gestión es ejecutada por el optimizador del HEMS, tomando en consideración el modelo operativo de la unidad reguladora de temperatura, el nivel de tolerancia de temperatura fijada por el usuario, el costo de la energía establecido por la tarifa de la temporada del año, y el pronóstico del nivel de actividad del usuario. De esta manera, el optimizador es capaz de predecir un perfil de temperatura durante cada hora del día, apropiado para reducir el nivel de consumo durante los intervalos de alta demanda energética y durante los altos precios de la energía.

Se realizaron algunas pruebas simuladas para la temporada de verano y de invierno, comparando el comportamiento operativo de estos electrodomésticos al emplear el HEMS y un control on/off convencional para regular la temperatura de una habitación. Para las pruebas simuladas se permitió una tolerancia de $\pm 2^\circ\text{C}$ a una temperatura deseada de 23°C , tanto para el caso del aire acondicionado como para el caso de la calefacción eléctrica. Entonces, atendiendo a estas consideraciones los resultados de las pruebas simuladas se muestran a continuación.

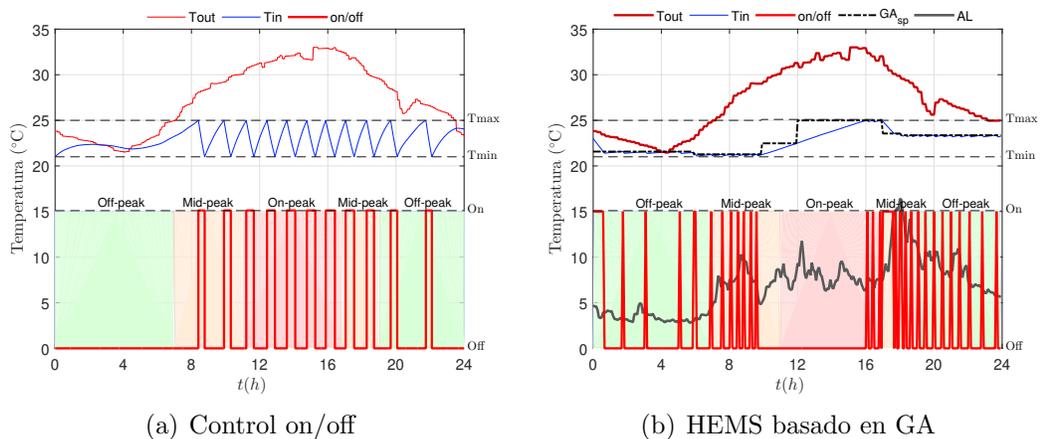


Figura 5.10: Gestión del aire acondicionado.

Para las Figuras 5.10a y 5.10b, T_{out} representa en $^\circ\text{C}$ la temperatura externa a la residencia; T_{in} la temperatura en $^\circ\text{C}$ dentro de la residencia; on/off indica el estado de la carga, si está encendida *On* y si se encuentra apagada *Off*; GA_{sp} define el perfil deseado de temperatura establecido por el optimizador del HEMS, y este se puede ver como un valor de consiga a seguir por el controlador; AL indica el nivel de actividad del usuario. Por último, también se muestran los intervalos para las diferentes tarifas de cobro fijadas por el TOU entre los que se encuentra operando la unidad reguladora de temperatura.

En la Figura 5.10 se muestra la gestión del aire acondicionado, presentando la comparativa entre el control on/off convencional y el control realizado a través del optimizador del HEMS, simulando la regulación de temperatura en el interior de una

residencia, considerando a su vez, las dinámicas del modelo de aire acondicionado presentado en el capítulo 4 de este trabajo. Por su parte, tal como se presenta en la Figura 5.10a, el control on/off opera dentro un rango de temperatura definido por el nivel de tolerancia fijado por el usuario. Las condiciones establecidas para el control on/off únicamente dependen de los límites de temperatura permitidos, manteniendo el nivel de temperatura de la casa dentro del rango de tolerancia establecido. Por otra parte, el HEMS define una nueva estrategia para la gestión de esta carga. En este sentido, el optimizador define la consigna GA_{SP} de manera heurística, siendo este el perfil deseado de temperatura al considerar el factor de consumo energético, costo de la energía y nivel de actividad del usuario, gestionando el encendido y apagado de la carga con la finalidad de seguir el perfil de temperatura GA_{SP} . De esta manera, el HEMS logra establecer un pre-enfriamiento de la casa que garantiza una temperatura agradable para el residente cuando este se encuentre en ella. Sin embargo, el pre-enfriamiento no solo busca el confort del usuario, sino también garantiza un menor consumo durante los intervalos de alto costo de la energía, lo que conlleva a un mayor ahorro tanto energético como económico.

En análisis de los resultados obtenidos, se puede observar que al emplear el HEMS la activación de la carga se realiza mayormente en los intervalos del Off-Peak y del Mid-Peak, evitando en gran parte la activación del aire acondicionado durante el On-Peak. Por su parte, como se muestra en la Figura 5.10b, la duración de la activación de la carga se reduce, a diferencia del control on/off presentado en la Figura 5.10, quien mantiene la carga encendida hasta que la temperatura dentro de la casa alcanza el límite superior de temperatura permitida, sin considerar el efecto sobre la factura al encender la carga durante el On-Peak. Entonces, al emplear el HEMS para el control inteligente se logra disminuir considerablemente el nivel de consumo y el alto costo en la factura por uso excesivo durante los intervalos de mayor cobro.

En este orden de ideas, la Tabla 5.6 valida de manera numérica los resultados presentados en la Figura 5.10.

Tabla 5.6: *Gestión del aire acondicionado implementando un control on/off y un control inteligente.*

Nivel de Costo	Consumo [kWh] (Control on/off)	Consumo [kWh] (HEMS)	Costo C\$ (Control on/off)	Costo C\$ (HEMS)	Ahorro respecto a la factura %
Baja (Off – Peak)	3.8380	2.8050	0.2379	0.1739	26.9020
Media (Mid – Peak)	8.9608	2.5500	0.8244	0.2346	71.5429
Alto (On – Peak)	12.9921	0.3825	1.4031	0.0413	97.0565
Total	25.7909	5.7375	2.4654	0.4498	81.7554

Respecto a los resultados numéricos obtenidos, se puede apreciar un ahorro energético considerable para cada tarifa de cobro. En este sentido, se logró reducir en un 26.90% el nivel de consumo durante el Off-Peak, en un 71.54% el nivel de consumo durante el Mid-Peak y en un 97.06% el nivel de consumo durante el On-Peak, lo que acarreó a un 81.75% de ahorro en la factura total diaria al emplear el HEMS, representando un ahorro significativo para el usuario residencial.

Por otra parte, al igual que el aire acondicionado, se gestiona la calefacción eléctrica, es decir, se planteó la misma metodología para la comparativa del comportamiento del calefactor eléctrico, empleando un control on/off que opera dentro de los límites de temperatura definidos por la máxima tolerancia permitida por el usuario y empleando un control definido por el optimizador HEMS quien opera en función de los costos de la energía y del nivel de actividad del usuario. Habiendo mencionado esto, los resultados de las pruebas simuladas realizadas al calefactor eléctrico se presentan a continuación.

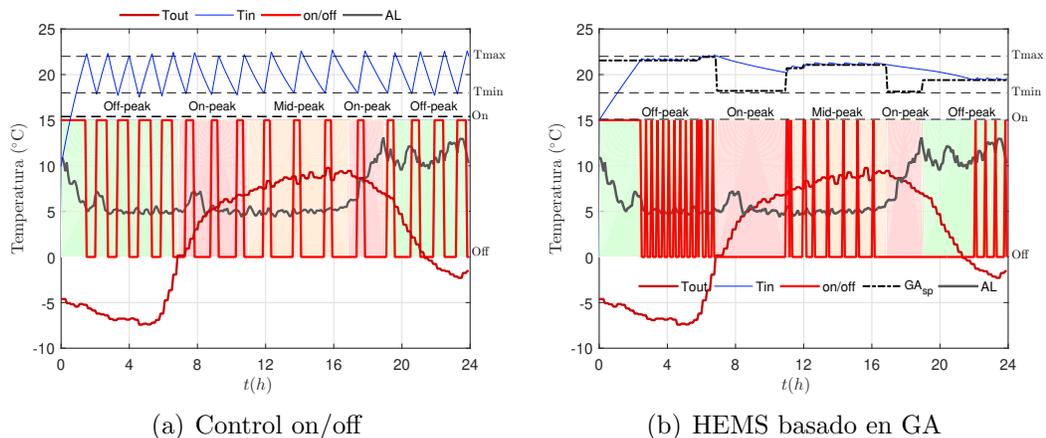


Figura 5.11: Gestión de la calefacción eléctrica.

La Figura 5.11 presenta el comportamiento del calefactor al emplear un control on/off convencional versus el comportamiento del calefactor al emplear un control inteligente realizado por el optimizador del HEMS. De esta manera, se puede observar en la Figura 5.11b que el control realizado por el HEMS predice los altos costos de la energía presentes en el On-Peak, por lo que realiza un precalentamiento de la casa para lograr mantener una temperatura cálida durante los On-Peak, de esta manera, se evita la utilidad del calefactor durante dichos intervalos de alto costo por consumo. Por otra parte, los periodos de encendido y apagado son mucho más cortos que al realizar un control on/off, tal como se puede apreciar en la Figura 5.11a. Los periodos largos de encendido y apagado conllevan a un mayor costo por consumo. Por otra parte, el control on/off no considera los efectos en la factura al encender el calefactor durante los On-Peaks, por lo que el control inteligente realizado por el HEMS resulta muy

conveniente, ya que reduce tanto el nivel de demanda energética como el alto costo de la factura diaria por consumo desmedido.

Ahora bien, la Tabla 5.7 presenta los resultados numéricos obtenidos de las pruebas simuladas, validando la eficiencia del control inteligente realizado por el optimizador del HEMS.

Tabla 5.7: *Gestión del calefactor eléctrico implementando un control on/off y un control inteligente.*

Nivel de Costo	Consumo [kWh] (Control on/off)	Consumo [kWh] (HEMS)	Costo C\$ (Control on/off)	Costo C\$ (HEMS)	Ahorro respecto a la factura %
Baja (Off – Peak)	15.2000	9.6000	0.9424	0.5952	36.8421
Media (Mid – Peak)	3.0000	2.0000	0.2760	0.1840	33.3333
Alto (On – Peak)	4.2000	0.0000	0.4536	0.0000	100.0
Total	22.4000	18.8045	1.6720	0.7792	53.3971

En este sentido se puede apreciar un ahorro energético considerable para cada tarifa. En este sentido, se logró reducir en un 36.84 % el nivel de consumo durante el Off-Peak, en un 33.33 % el nivel de consumo durante el Mid-Peak y en un 100 % el nivel de consumo durante el On-Peak, lo que conllevó a un 53.39 % de ahorro en la factura total diaria al hacer uso del HEMS.

5.5. Energías Renovables a Nivel Residencial

Este caso de estudio presenta la integración de las DGUs basadas en energías renovables al HEMS; se realizaron pruebas para observar el efecto que se tiene sobre la demanda total de los electrodomésticos al incluir una pequeña red de generación de nivel residencial. La finalidad fue la de observar los beneficios que las energías renovables proporcionarían a los usuarios residenciales, garantizando una mayor autonomía de la red residencial, reduciendo los niveles de demanda exigida a la red principal y logrando a su vez, una considerable disminución en los costos por consumo excesivo.

La Nano Red en estudio está compuesta por un sistema de un área generador y de un conjunto de paneles solares que respaldaron con una cantidad considerable de energía a la red de consumo residencial. En este orden de ideas, la Nano Red adapta las siguientes características operativas a los modelos considerados para las unidades de generación:

Tabla 5.8: *Condiciones operativas para la turbina de viento*

V_{ci}	V_r	V_{co}	P_{max}^w
3.5 [m/s]	12 [m/s]	23 [m/s]	1 [kWh]

Tabla 5.9: *Parámetros para el panel solar*

η_{pv}	A_p	Aporte por unidad	N_{pv}	P_{max}^{pv}
14.55 %	1.64 [m ²]	0.24[kWh]	13	3.12 [kWh]

Para las Tablas 5.8 y 5.9 los parámetros indicados se encuentran detallados en el capítulo 4 de este trabajo de tesis, en la sección correspondiente al modelado de cada una de las unidades de generación. Por su parte, cabe destacar que el nivel de aporte máximo de potencia de las unidades en este caso es de 1 [kWh] por parte del aero generador y de 3.12 [kWh] por parte del conjunto de paneles solares, sumando un aporte total de 4.12 [kWh] de máximo aporte bajo condiciones ideales.

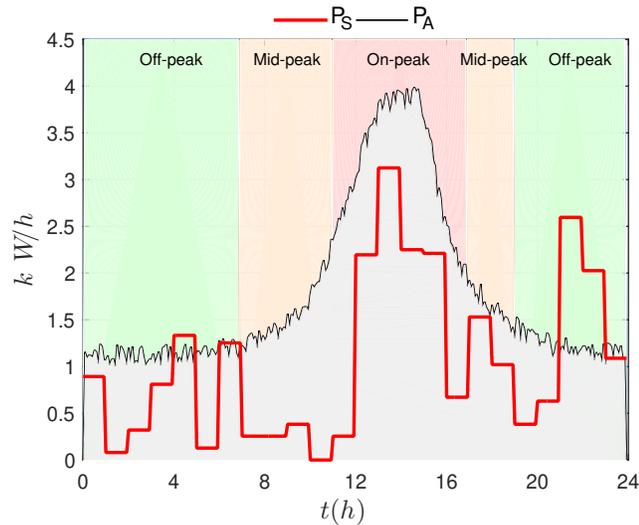
En este caso de estudio, para las cargas residenciales se fijan las condiciones operativas de la siguiente tabla:

Tabla 5.10: *Condiciones operativas de los electrodomésticos para la integración de la Nano Red*

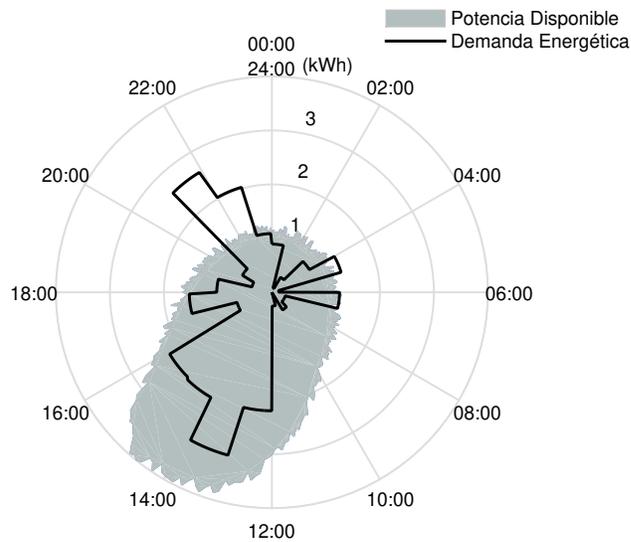
cargas e	Ventana 1 (h)	Uso (min)	Ventana 2 (h)	Uso (min)	Ventana 3 (h)	Uso (min)
	$\alpha_e - \beta_e$	d_e	$\alpha_e - \beta_e$	d_e	$\alpha_e - \beta_e$	d_e
ee	06:00-09:00	30	13:30-16:00	90	20:30-23:00	30
sr	07:00-20:00	60	-	-	-	-
ml	01:00-6:55	90	-	-	-	-
lp	12:00-15:00	60	21:00-24:00	60	-	-
ba	03:00-08:00	60	09:00-17:00	60	22:00-24:00	60

Por otra parte, la simulación se realizó para la temporada de verano, por lo que se establece el perfil de temperatura y las tarifas de cobro definidas para dicha temporada, integrando a su vez, el aire acondicionado al conjunto de cargas residenciales presentadas en la Tabla 5.10.

Ya conocidas las cargas residenciales, los perfiles de temperatura, las condiciones operativas de los electrodomésticos y las tarifas de cobro que se integran al HEMS en este caso de estudio, se presentan a continuación los resultados obtenidos de las pruebas simuladas.



(a) Aprovechamiento de la Nano Red integrando las tarifas de cobro



(b) Aprovechamiento de la Nano Red observando la disponibilidad energética

Figura 5.12: Integración de las Energías Renovables.

La Figura 5.12 presenta dos imágenes que muestran los resultados obtenidos al permitir al HEMS la gestión de las cargas residenciales en función del aprovechamiento de la Nano Red. En este sentido, La Figura 5.12a muestra el perfil de demanda de las cargas como P_S y la de disponibilidad de la Nano Red P_A en función de las diferentes tarifas de cobro. Por otro lado, la Figura 5.12b presenta una gráfica polar que

muestra en sentido horario el aprovechamiento que se le da a la Nano Red. También es importante destacar que el optimizador basado en GA del HEMS considera dos factores importantes, la tarifa de cobro y el nivel de consumo, con el objetivo de determinar quién representa la mejor solución del conjunto de soluciones obtenidas. Aquí, el nivel de consumo para la factura se toma a partir de los excedentes de demanda que se observan por encima de la disponibilidad energética proporcionada por la Nano Red. Por otra parte, es importante resaltar que para la facturación final no se está tomando en cuenta el descuento percibido por la Nano Red, por la energía suministrada a la red principal.

En análisis, gran parte de la utilidad de los electrodomésticos son gestionados en las horas de mayor disponibilidad de la Nano Red, es decir, entre las 12:00 y las 17:00 horas aproximadamente. Cabe destacar, que la mayor parte de la demanda excedente se concentra en los *Off-Peak*, esto debido a que el optimizador considera más conveniente en términos de costo, fijar los excedentes en los intervalos de menor cobro. Por su parte, es importante resaltar que la decisión del optimizador del HEMS depende directamente de las condiciones operativas definidas por el usuario, esto con la finalidad de justificar los picos de energía excedente entre las 21:00 y 23:00 horas, y esto se puede apreciar en la Figura 5.12b, quién presenta el aprovechamiento que se le da a la Nano Red doméstica.

Con la finalidad de validar los resultados de manera numérica se presenta la Tabla 5.11, mostrando una comparativa de consumo y costo al incluir las unidades de generación. Por otra parte, se incluye un término denominado *Aprovechamiento de la Nano Red*, este indica que, entre menor cantidad de energía se pueda disponer de la Nano Red luego cubrir con la demanda energética en cada intervalo de cobro, mayor aprovechamiento se le dio a esta. La ecuación que se emplea para poder determinar el aprovechamiento de la Nano Red se presenta a continuación:

$$Apr^{NR} = \frac{(D_E - C_E)}{A_{NR}} \times 100 \quad (5.1)$$

Donde Apr^{NR} indica el aprovechamiento de la Nano Red dado en (%); D_E se define como la demanda energética dada en $[kWh]$; C_E se define como el consumo excedente dado en $[kWh]$; y finalmente A_{NR} indica el aporte de la Nano Red dado en $[kWh]$.

Tabla 5.11: Comparativa de consumo y costo por inclusión de la Nano Red

Nivel de Costo	Aporte de la Nano Red [kWh]	Demanda Energética [kWh]	Factura sin Nano Red (C\$)	Aprovechamiento de la Nano Red %	Consumo Excedente [kWh]	Factura con Nano Red (C\$)	Ahorro respecto a la factura %
Baja (<i>Off-peak</i>)	13.9770	11.5390	0.7154	47.3213	4.9249	0.3053	57.3245
Media (<i>Mid-peak</i>)	9.7371	3.4425	0.3167	34.5470	0.07862	0.0072	97.7265
Alto (<i>On-peak</i>)	18.9540	10.7080	1.1564	56.4946	0.0000	0.0000	100.00
Total	42.6670	25.6900	2.1886	48.4836	5.0035	0.3125	85.7214

En análisis a los resultados presentados en la Tabla 5.11, se puede apreciar un gran aprovechamiento de la Nano Red en cada uno de los intervalos de cobro, utilizando de la Nano Red un 47.32% de la energía disponible durante el *Off-Peak*, un 34.54% durante el *Mid-Peak* y un 56.49% durante el *On-Peak*. En efecto, se logró aprovechar un 48.48% de la energía total proporcionada de la Nano Red. Por otra parte, se resalta que el optimizador gestiona el estado de las cargas en función de la energía proporcionada por la Nano Red, garantizando de este modo el mejor aprovechamiento de la Nano Red y a su vez evitando en gran parte los excedentes durante el *Mid-Peak* y el *On-Peak*. De este modo, al implementar el HEMS para explotar el aprovechamiento de la Nano Red, se logra obtener un ahorro del 85.72% en la factura total del día. Por su parte, se debe mencionar que no se están considerando el dimensionamiento de la Nano Red ni los costos por equipos sobre la factura total. Sin embargo, los resultados apuntan a considerar conveniente la integración de las unidades de generación para garantizar una mayor autonomía de la red doméstica y mayores beneficios económicos al usuario residencial.

5.6. Unidad de Almacenamiento

Las pruebas realizadas con la unidad de almacenamiento se realizaron con la finalidad de analizar los beneficios energéticos y económicos que acarrea la inclusión de este tipo de unidades al sistema bajo estudio. En este sentido, para la unidad considerada en esta sección se tomaron en cuenta las características presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 5.12: Parámetros operativos de la unidad de almacenamiento

Pr_c	Pr_d	P_{max}	DOD
0.8 [kWh]	0.8 [kWh]	4 [kW]	60 %

En la Tabla 5.12 se presentan los parámetros que se integraron al modelo operativo de la unidad de almacenamiento. Es importante recordar que Pr_c y Pr_d

representan la tasa de carga y descarga respectivamente, es decir, el nivel de carga o descarga que presenta la batería por cada hora de uso. Por otra parte se incluye el P_{max} , quién indica la máxima cantidad de energía que puede almacenar la unidad. Por último se tiene el DOD , parámetro que representa la máxima profundidad de descarga permitida en la batería.

Para las pruebas simuladas se consideraron aspectos tales como la inclusión de la Nano Red, bajo las condiciones operativas de la Tabla 5.13 para la unidad de viento y las condiciones operativas de la Tabla 5.14 para las celdas solares. El análisis también se realizó en respuesta a los diferentes intervalos de cobro *Off-Peak*, *Mid-Peak* y *On-Peak* proporcionados por el TOU. En otras palabras, los resultados obtenidos al implementar el HEMS responden a las condiciones fijadas por los costos, la disponibilidad energética de la Nano Red y la capacidad de carga y descarga de la unidad de almacenamiento.

Tabla 5.13: *Condiciones operativas para la turbina de viento*

V_{ci}	V_r	V_{co}	P_{max}^w
3.5 [m/s]	12 [m/s]	23 [m/s]	1 [kWh]

Tabla 5.14: *Parámetros para el panel solar*

η_{pv}	A_p	Aporte por unidad	N_{pv}	P_{max}^{pv}
14.55 %	1.64 [m ²]	0.24[kWh]	13	3.12 [kWh]

Tabla 5.15: *Condiciones operativas de los electrodomésticos para la integración de la Nano Red*

cargas e	Ventana 1 (h)	Usos (min)	Ventana 2 (h)	Usos (min)	Ventana 3 (h)	Usos (min)
	$\alpha_e - \beta_e$	d_e	$\alpha_e - \beta_e$	d_e	$\alpha_e - \beta_e$	d_e
ee	06:00-09:00	30	13:30-16:00	90	20:30-23:00	30
sr	07:00-20:00	60	-	-	-	-
ml	01:00-6:55	90	-	-	-	-
lp	12:00-15:00	60	21:00-24:00	60	-	-
ba	03:00-08:00	60	09:00-17:00	60	22:00-24:00	60

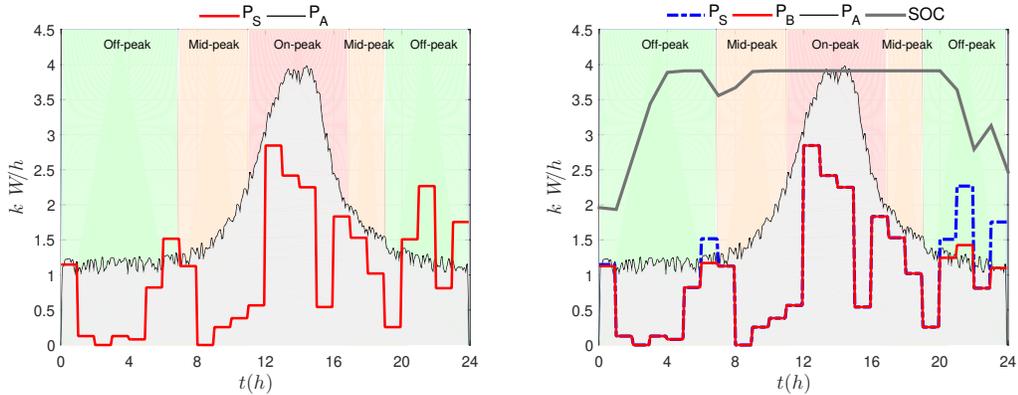
Por otra parte, la simulación se realizó para la temporada de verano, por lo que se establece el perfil de temperatura y las tarifas de cobro definidas para dicha temporada, integrando a su vez, el aire acondicionado al conjunto de cargas residenciales presentadas en la Tabla 5.15.

Dicho esto, los resultados obtenidos de las pruebas simuladas se presentan a continuación:

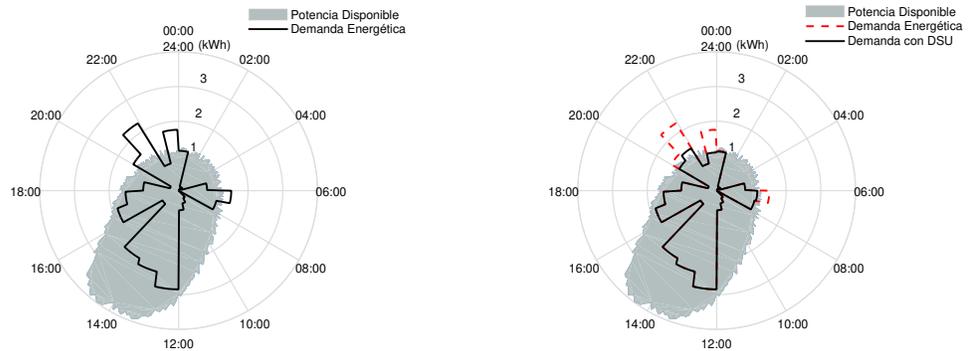
Tabla 5.16: *Generación de la Nano Red*

Nivel de Costo	Aporte de la Nano Red [kWh]	Demanda Energética [kWh]	Factura sin Nano Red (C\$)
Baja (Off - Peak)	13.9540	10.4140	0.6457
Media (Mid - Peak)	9.7478	4.3125	0.3967
Alto (On - Peak)	18.9290	10.4520	1.1289
Total	42.6410	25.1790	2.1713

En la Tabla 5.16 se presenta el nivel de energía disponible de la Nano Red, el nivel de demanda energética y la factura para cada intervalo de cobro fijado por el TOU. En este sentido, se presenta que el usuario al no hacer uso de las energías renovables, este por su parte deberá pagar un monto total de 2.1713 C\$ para el día de consumo simulado.



(a) Disponibilidad de la Nano Red y perfil de demanda óptimo (b) Nuevo perfil de demanda al integrar la DSU



(c) Aprovechamiento de la Nano Red (d) Aprovechamiento de la Nano Red al integrar la DSU

Figura 5.13: *Integración de las Energías Renovables.*

Las figuras presentadas anteriormente establecen una comparativa respecto al perfil de la demanda obtenido al no incluir la batería y al incluir la batería. En este sentido, en la Figura 5.13a se presentan dos perfiles, P_A para indicar la disponibilidad de la Nano Red y P_S para indicar el perfil de consumo de las cargas. La Figura 5.13b incluye dos perfiles nuevos a la Figura 5.13a, el SOC para indicar el estado de la carga de la unidad de almacenamiento, y el P_B para indicar el nuevo estado del perfil de la demanda al descargar la batería en los intervalos de excedente energético. Por su parte, el perfil P_S describe el perfil de la demanda energética al no descargar la batería. Por otra parte, se encuentran las Figuras 5.13c y 5.13d quienes presentan de manera radial el aprovechamiento que se le da a la Nano Red al no incluir la batería y al incluir la batería respectivamente.

En análisis a los resultados presentados en los gráficos, se puede indicar que resultó conveniente incluir la unidad de almacenamiento al HEMS, ya que se observó una reducción considerable de consumo energético en los intervalos de alta demanda, es decir, entre las 20:00 y 23:00 horas del día, garantizando un mejor aprovechamiento de la Nano Red y una menor dependencia del sistema eléctrico principal. Ahora bien, a fin de corroborar los datos presentados en los gráficos, se indican los resultados numéricos en la tabla mostrada a continuación:

Tabla 5.17: Comparativa de facturación

Nivel de Costo	Aprovechamiento de la Nano Red %	Consumo Excedente [kWh]	Factura de cobro (C\$)	Ahorro respecto a la factura %	Aprovechamiento de la Nano Red con DSU %	Consumo Excedente [kWh]	Factura de cobro (C\$)	Ahorro respecto a la factura %
Baja (<i>Off - Peak</i>)	43.6484	4.3233	0.2680	58.4946	72.2889	0.3268	0.0202	92.4268
Media (<i>Mid - Peak</i>)	38.7872	0.5316	0.0738	81.3965	44.2407	0.0000	0.0000	100.00
Alto (<i>On - Peak</i>)	55.2168	0.0000	0.0000	100.00	55.2168	0.0000	0.0000	100.00
Total	47.6632	4.8549	0.3418	84.2582	58.2824	0.3268	0.0202	99.0696

En comparativa de los resultados presentados en la Tabla 5.17, al integrar la unidad de almacenamiento, se puede apreciar un mayor aprovechamiento de la Nano Red para cada uno de los intervalos de cobro, reflejándose en un incremento del 40.78 % en el ahorro total de la factura de cobro diaria. Tal como se puede apreciar, para los intervalos de mayor cobro, es decir, entre el *Mid-Peak* y el *On-Peak*, se garantizó un total a pagar de 0 \$, esto indica que, la integración de la unidad de almacenamiento aportó muy buenos beneficios respecto a la reducción de la factura total y respecto al aprovechamiento de las unidades de generación integradas al HEMS.

5.7. Evaluación Multiobjetivo

La presencia de objetivos múltiples en un problema, en principio, da lugar a un conjunto de soluciones óptimas (en gran parte conocidas como soluciones Pareto-Óptimas), en lugar de una única solución óptima. En ausencia de más información, no se puede afirmar que alguna de estas soluciones óptimas de Pareto sea mejor que la otra. Esto exige que el algoritmo encuentre tantas soluciones Pareto-óptimas como sea posible. En este sentido, para este caso de estudio se presenta un conjunto de soluciones obtenidas al definir la evaluación de funciones con objetivos individuales y con funciones multiobjetivo. Debido a la necesidad de evaluar dos tópicos importantes dentro de los problemas energéticos como lo son la demanda y el costo por consumo energético. Por su parte, en esta sección se muestra una comparativa entre la evaluación individual de cada objetivo, la evaluación multi-objetivo a través de la función (4.20) descrita en la sección 4.6 quién se rige bajo un esquema basado en pesos y la resolución del problema multiobjetivo planteado, a través de la construcción de un frente de Pareto-óptimo.

Por otra parte, se integró una Nano Red ideal cuyo aporte energético no se condicionó a factores de irradiancia variable, en el sentido de garantizar siempre el mismo perfil de generación para las distintas simulaciones realizadas, estableciendo una comparativa sujeta al mismo nivel de energía disponible durante todas las pruebas, por lo tanto, el perfil de disponibilidad de la Nano Red será diferente al de los casos de estudio considerados anteriormente. Entonces, las características que presentaron las unidades están establecidas para que los modelos de viento aporten siempre un máximo de 1 $[kWh]$ y los paneles un máximo de 3.12 $[kWh]$ siguiendo una distribución gaussiana con media en las 14:00 horas del día y una varianza de 2 horas respecto a la media. Por otra parte, las cargas, las condiciones operativas y las tarifas por consumo energético son las presentadas en las Tablas 5.4 y 5.1.

La Tabla 5.18 presenta el aporte energético de la Nano Red en los 3 niveles de cobro que se consideraron para las diferentes pruebas realizadas:

Tabla 5.18: *Nano Red Ideal*

Nivel de Costo	Aporte de la Nano Red [kWh]	Cobertura por Generación (C\$)
Baja (<i>Off - Peak</i>)	12.011	0.7807
Media (<i>Mid - Peak</i>)	7.8663	0.7473
Alto (<i>On - Peak</i>)	19.251	2.5412
Total	39.128	4.0692

Respecto a las pruebas realizadas, cabe destacar que se efectuaron las evaluaciones individuales de las funciones objetivo, a fin de comparar los resultados obtenidos de la evaluación de las funciones objetivo individuales, con los resultados obtenidos de la evaluación de la función multiobjetivo. Por otra parte, la solución obtenida de la función multiobjetivo basada en el esquema de pesos, es comparada con la solución obtenida a través de la construcción del frente de pareto-óptimo. Dicho esto, los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas se presentan a continuación:

Tabla 5.19: *Comparativa de funciones objetivo*

Tarifa	Solución mono-objetivo por costo			Solución mono-objetivo por consumo			Solución multi-objetivo en base a pesos		
	Aprovechamiento de la Nano Red %	Consumo Excedente [kWh]	Factura (C\$)	Aprovechamiento de la Nano Red %	Consumo Excedente [kWh]	Factura (C\$)	Aprovechamiento de la Nano Red %	Consumo Excedente [kWh]	Factura (C\$)
Baja (<i>Off - Peak</i>)	54.68	5.2942	0.3441	55.73	5.1678	0.33591	54.74	5.2867	0.3436
Media (<i>Mid - Peak</i>)	37.11	1.0936	0.10389	40.05	0.8624	0.0819	38.44	0.9886	0.0939
Alto (<i>On - Peak</i>)	50.72	0.3064	0.04044	49.26	0.5872	0.0775	51.07	0.2393	0.0315
Total	51.75	6.6941	0.4885	51.95	6.6174	0.4953	52.21	6.5145	0.4691

En análisis a la Tabla 5.19 es importante resaltar el desempeño de la evaluación multiobjetivo sobre las evaluaciones individuales realizadas, ya que esta estableció un equilibrio entre los objetivos de evaluación de costo y consumo respectivamente; por otra parte, en comparativa de los resultados obtenidos de la evaluación de los objetivos individuales, se muestra que para el caso de la evaluación individual del costo se obtiene un mejor precio en la factura respecto a la evaluación individual del consumo, sin embargo el nivel de consumo se encuentra ligeramente por encima del consumo obtenido al evaluar de manera individual el objetivo por consumo.

En referencia al frente de Pareto, este se construyó a partir de las distintas soluciones obtenidas de la multi evaluación del GA integrado como optimizador del HEMS. En este sentido, el optimizador realizó 20 evaluaciones del sistema a fin de explorar diferentes soluciones. A partir de aquí, se construyó un frente de soluciones óptimas no dominadas entre ellas, es decir, cada una de las soluciones obtenidas de la multi evaluación representaron una solución factible que resuelve el problema de optimización bajo estudio, y cuya solución individual no se ve afectada por las demás soluciones presentes en el frente de Pareto. Por otra parte, la selección de la solución se realiza de manera automática, es decir el sistema se encargó de escoger una solución factible de las 20 obtenidas, cuyo criterio considerado fue que al menos uno de sus objetivos fuera mucho mejor que las demás soluciones del frente de Pareto construido, en el sentido de garantizar la solución que mejora un objetivo respecto a las demás soluciones evaluadas, tal como se explicó en la sección 3.6.

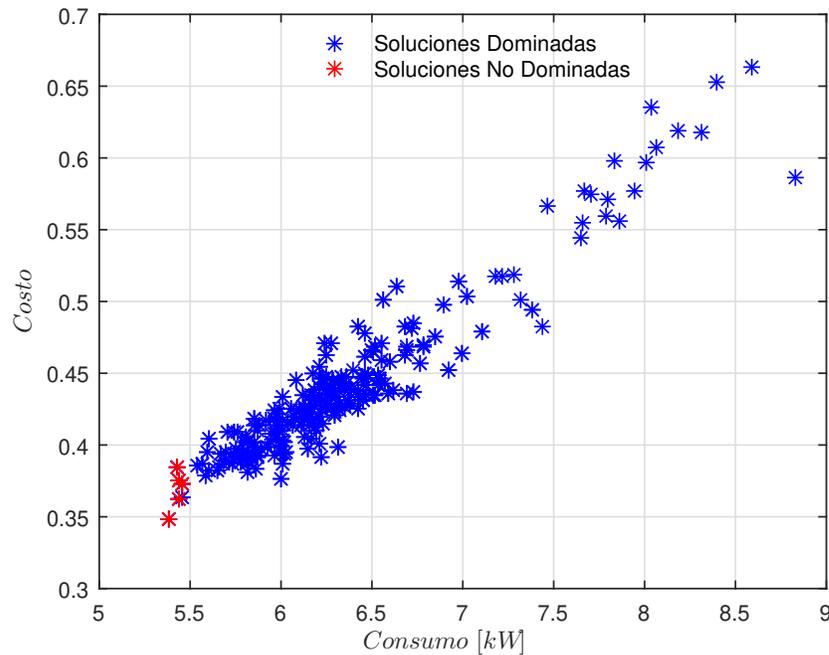


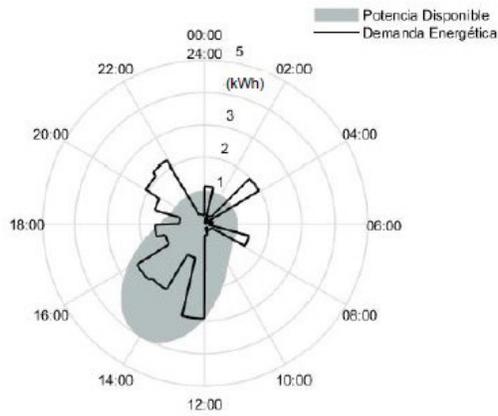
Figura 5.14: *Frente de Pareto.*

En análisis de la Figura 5.14, los grupos azules representan en su totalidad todas las soluciones de la mejor población obtenida, los grupos rojos representan las soluciones que conforman el frente de Pareto-Óptimo, las cuales cumplen con los criterios de optimalidad y dominancia descritos en la sección 3.6. Por su parte, todas las soluciones no dominadas presentes en el frente de Pareto representan soluciones óptimas. Por otra parte, a pesar de que la solución es seleccionada del frente de Pareto, el criterio de selección de la mejor solución se basa en los requerimientos del usuario residencial, quién decide cual solución se adapta mejor a sus requerimientos, en este sentido, el usuario es capaz de definir si su preferencia es reducir el consumo o reducir el costo de su factura y de acuerdo a este criterio, el algoritmo decide cual solución le aporta mejores beneficios, por supuesto, seleccionando la solución que mejor se adapte a sus necesidades y que mayor aprovechamiento le dé a la Nano Red doméstica.

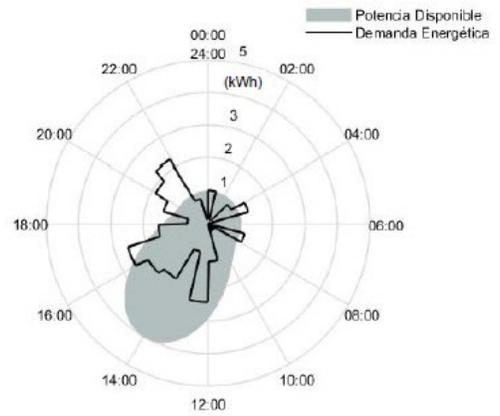
En este sentido, en la siguiente tabla se realizó una comparativa entre la mejor solución obtenida de una única corrida del GA versus la solución considerada como la mejor del frente de Pareto construido:

Tabla 5.20: Comparativa del frente de Pareto

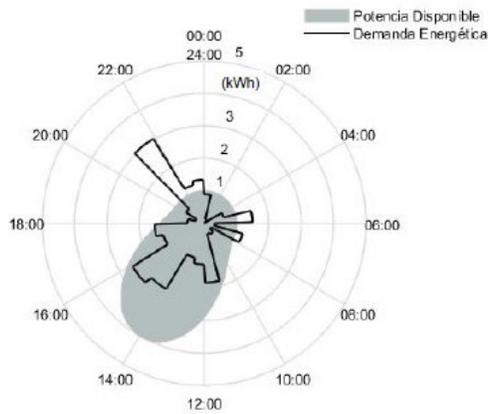
Tarifa	Solución multi-objetivo en base a pesos			Solución multi-objetivo por frente de Pareto		
	Aprovechamiento de la Nano Red %	Consumo Excedente [kWh]	Factura (C\$)	Aprovechamiento de la Nano Red %	Consumo Excedente [kWh]	Factura (C\$)
Baja (Off - Peak)	54.74	5.2867	0.3436	57.07	5.0070	0.3104
Media (Mid - Peak)	38.44	0.9886	0.0939	48.64	0.1861	0.0171
Alto (On - Peak)	51.07	0.2393	0.0315	51.31	0.1929	0.02084
Total	52.21	6.5145	0.4691	55.10	5.3861	0.3484



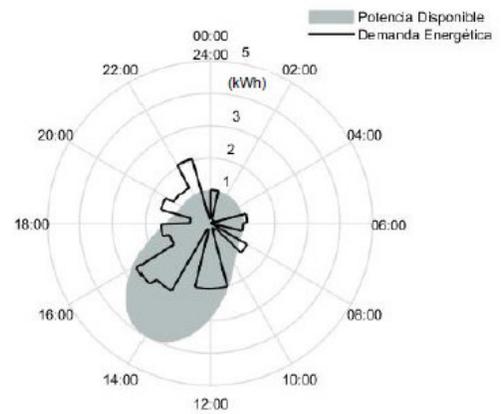
(a) Mono-objetivo por costo



(b) Mono-objetivo por consumo



(c) Multi-objetivo en base a pesos



(d) Multi-Objetivo en base a Frente de Pareto

Figura 5.15: Soluciones presentadas para el aprovechamiento de la Nano Red.

En la Figura 5.15 se muestra una comparativa entre las soluciones obtenidas tanto para las evaluaciones de los objetivos individuales como para la evaluación multiobjetivo y frente de Pareto respectivamente. Donde notablemente la solución por frente de Pareto garantizó un mejor aprovechamiento de la disponibilidad energética respecto a las soluciones de los demás casos considerados, ya que se obtuvo una disminución considerable en los altos picos de consumo excedente presentes en las demás evaluaciones.

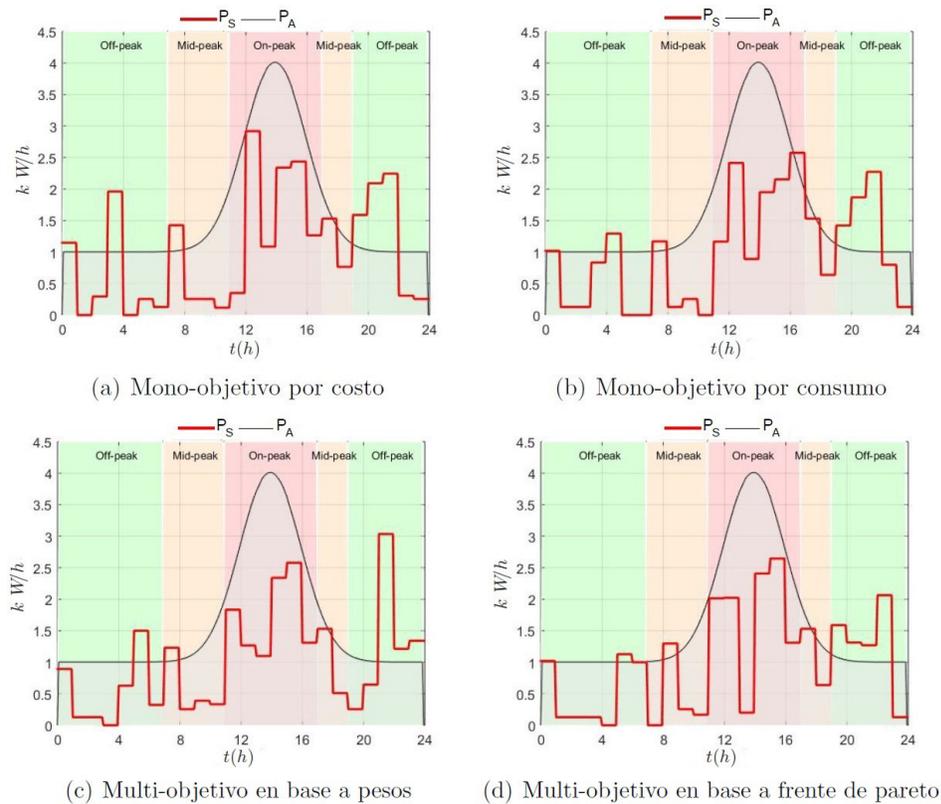


Figura 5.16: *Demanda y disponibilidad de la Nano Red.*

La Figura 5.16 muestra una comparativa entre las evaluaciones individuales y la evaluación multiobjetivo versus la solución tomada del frente de Pareto. Aquí, aunque todas las soluciones representan la mejor solución obtenida de cada evaluación en términos de costo y consumo, algunos picos de demanda se presentaron debido a la naturaleza del algoritmo de redistribuir la mayor parte de la carga excedente en los intervalos de menor cobro, sin embargo, la solución seleccionada del frente de Pareto representó una solución que no sólo mejoró el costo y el consumo, sino también permitió un consumo mayormente planto en los intervalos de demanda excedente, mejorando la redistribución de la demanda.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajos Futuros

6.1. Conclusiones

- Los casos de estudio analizados sirvieron para evaluar el comportamiento del HEMS ante diversos escenarios operativos.
- Los resultados que se obtienen al implementar el HEMS en base a un GA multi-objetivo mostraron una reducción en el nivel de consumo y costo generado por la demanda desmedida de energía dentro del sistema eléctrico residencial modelado.
- La validación del sistema sirvió para establecer un punto de comparación entre el comportamiento del HEMS que se propone y una herramienta de uso comercial como lo es el SRLS, observando un comportamiento similar al someter las cargas residenciales bajo condiciones operativas similares en ambas herramientas.
- La construcción de un Frente de Pareto-Óptimo proporcionó una solución que garantizó un consumo mejor adaptado a los perfiles variables de la disponibilidad energética de la Nano-Red residencial, garantizando un mejor aprovechamiento de esta y un consumo más plano respecto a las horas de altos picos de demanda.
- El HEMS propuesto no solamente permite el análisis de las cargas que se presentaron en este trabajo, sino también queda abierta a la integración y gestión de un mayor número de cargas residenciales, ya sean los requerimientos de los usuarios que la quieran emplear.
- El HEMS por su parte, sugiere al usuario el uso recomendado para cada una de las cargas consideradas, de tal forma que se obtengan los mejores beneficios económicos para el usuario, sin imponer un cambio en los hábitos de éste. Asimismo, que es posible dirigir el consumo hacia un mayor aprovechamiento

de las energías renovables y de las unidades de almacenamiento que se integren al sistema, logrando una mayor autonomía del sistema residencial.

- Finalmente, mediante la programación óptima de cargas a través del HEMS propuesto es posible disminuir el pago por consumo energético en sistemas regidos por tarifas de cobro, además de disminuir el consumo durante las horas de alta demanda y lograr un mayor aprovechamiento de las unidades de generación y de las unidades de almacenamiento sin comprometer el nivel de confort del residente.

6.2. Trabajos Futuros

Con respecto a la investigación desarrollada hasta el momento, se proponen los siguientes temas como posibles trabajos futuros:

- Desarrollar una interfaz gráfica que permita una mejor interacción del usuario con el HEMS.
- Establecer estrategias que permitan la venta de energía excedente de la Nano Red a la red principal.
- Proponer la integración de nuevos modelos de cargas residenciales para integrarlas posteriormente al HEMS propuesto.
- Plantear estrategias para mejorar el rendimiento operativo de las unidades de almacenamiento integradas al sistema.

Publicaciones

C. Moreno, J. Lozano, V. Gutierrez, I. Hernandez, A. Zamora, O. Villalón, “Programación Óptima de Cargas Residenciales ante Variación de Costos en Tiempo Real”, in *2017 8th International Symposium on Innovation and Technology (ISIT)*, Guanajuato, México, Oct. 2017.

C. Moreno, D. Toro, Y. Tutira, J. Lozano, A. Martínez, E. Zamora, H. Estrada, “Controladores Primarios de Potencia Activa en Micro-Redes No-Autónomas”, in *Annual Meeting on Innovation, Technology and Engineering (AMITE)*, Veracruz, Mexico, Dic. 2016.

Bibliografía

- [1] R. Wüstenhagen, M. Wolsink, and M. J. Bürer, “Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 5, pp. 2683 – 2691, 2007.
- [2] R. H. Lasseter, “Microgrids,” in *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, vol. 1, pp. 305–308 vol.1, 2002.
- [3] F. Corno and F. Razzak, “Intelligent energy optimization for user intelligible goals in smart home environments,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 2128–2135, Dec 2012.
- [4] M. R. Khan and E. D. Brown, *A Concept of DC Nano-Grid for Low Cost Energy Access in Rural Bangladesh*, pp. 33–42. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [5] T. T. Kim and H. V. Poor, “Scheduling power consumption with price uncertainty,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, pp. 519–527, Sept 2011.
- [6] P. Coldwell, L. Rodríguez, C. Hernández, M. Melgar, G. Hernández, R. Rionda, and V. Avilés, “Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029,” 2015.
- [7] M. Liska, M. Ivanic, V. Volcko, and P. Janiga, “Research on smart home energy management system,” in *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, pp. 459–463, May 2015.
- [8] C. Marnay, “Future roles of milli-,micro-, and nano- grids,” *CIGRE International Symposium The electric power system of the future- integrating supergrids and microgrids*, pp. 13–15, 2012.
- [9] Z. Zhao, W. C. Lee, Y. Shin, and K. B. Song, “An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 1391–1400, Sept 2013.

- [10] C. Goldman, M. Reid, L. Silverstein, and A. Silverstein, “Coordination of Energy Efficiency and Demand Response,” 2010.
- [11] M. Fahrioglu, “Effect of demand management on regulated and deregulated electricity sectors,” *Energy Policy*, vol. 90, pp. 115 – 120, 2016.
- [12] F. Saffre and R. Gedge, “Demand-side management for the smart grid,” in *2010 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium Workshops*, pp. 300–303, April 2010.
- [13] P. S. N. R. Patne, and A. M. Jadhav, “A smart demand side management mechanism for domestic energy consumers with major hvac load,” in *2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, pp. 504–511, Dec 2016.
- [14] M. Adentuji and M. Shuaibu, “The Demand for Residential Electricity in Nigeria: A Bound Testing Approach,” *Research Gate*, pp. 1–16, 2009.
- [15] S. Zhou, Z. Wu, J. Li, and X. ping Zhang, “Real-time energy control approach for smart home energy management system,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, no. 3-4, pp. 315–326, 2014.
- [16] M. C. Bozchalui, S. A. Hashmi, H. Hassen, C. A. Canizares, and K. Bhattacharya, “Optimal operation of residential energy hubs in smart grids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 1755–1766, Dec 2012.
- [17] A. Konak, D. W. Coit, and A. E. Smith, “Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial,” *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, no. 9, pp. 992 – 1007, 2006. Special Issue - Genetic Algorithms and Reliability.
- [18] B. Ruan, Q. Yang, X. Fang, and W. Yan, “Demand response under real-time pricing for domestic energy system with dgs,” in *2014 International Conference on Power System Technology*, pp. 3103–3110, Oct 2014.
- [19] Q. Hu and F. Li, “Hardware design of smart home energy management system with dynamic price response,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 1878–1887, Dec 2013.
- [20] I. groups, “Consumo per cápita en Mexico 1980-2013.”
- [21] PRODESEN, “Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional,” tech. rep., PRODESEN, 2017.
- [22] Worl Bank Group, “Doing Business 2017 Equal Opportunity for All,” tech. rep.
- [23] World Energy Council, “World Energy Resources,” 2016.

- [24] H. Farhangi, “The path of the smart grid,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 8, pp. 18–28, January 2010.
- [25] Smart Grid Advisory Committee, “Energy Independence and Security Act. of 2007,” 2007.
- [26] M. McGranaghan, D. V. Dollen, P. Myrda, and E. Gunther, “Utility experience with developing a smart grid roadmap,” in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1–5, July 2008.
- [27] R. Kempener, P. Komor, and A. Hoke, “Smartgrids and Renewables a Guide for Effective Deployment.” 2013.
- [28] R. E. Brown, “Impact of smart grid on distribution system design,” in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1–4, July 2008.
- [29] T. Samad and S. Kiliccote, “Smart grid technologies and applications for the industrial sector,” *Computers and Chemical Engineering*, vol. 47, pp. 76 – 84, 2012. {FOCAPO} 2012.
- [30] A. Mahmood, M. Aamir, and M. I. Anis, “Design and implementation of amr smart grid system,” in *2008 IEEE Canada Electric Power Conference*, pp. 1–6, Oct 2008.
- [31] IEA, “Technology Roadmap Smart Grids.” 2011.
- [32] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, “Defining control strategies for microgrids islanded operation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, pp. 916–924, May 2006.
- [33] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, “Microgrids management,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, pp. 54–65, May 2008.
- [34] Y. Zhang, H. J. Jia, and L. Guo, “Energy management strategy of islanded microgrid based on power flow control,” in *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp. 1–8, Jan 2012.
- [35] L. R. Phillips, “Managing microgrids using grid services,” in *2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, pp. 1–5, April 2007.
- [36] Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, “Ley de la Industria Eléctrica,” 2015.
- [37] L. Neij, “Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology,” *Energy Policy*, vol. 25, no. 13, pp. 1099 – 1107, 1997.

- [38] T. Logeswaran and A. SenthilKumar, “A review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems under uniform and non-uniform irradiances,” *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 228 – 235, 2014. 4th International Conference on Advances in Energy Research (ICAER 2013).
- [39] M. Wolsink, “The research agenda on social acceptance of distributed generation in smart grids: Renewable as common pool resources,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 822 – 835, 2012.
- [40] M. Liserre, T. Sauter, and J. Hung, “Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics,” *IEEE iNDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE*, pp. 18–37, 2010.
- [41] WADE THAI, *Handbook: Smart/Intelligent Grid Systems Development and Deployment*. 2013.
- [42] Y. Cao, S. Tang, C. Li, P. Zhang, Y. Tan, Z. Zhang, and J. Li, “An optimized ev charging model considering tou price and soc curve,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 388–393, March 2012.
- [43] H. A. B. III and A. C. Lusk, “Addressing electric vehicle (ev) sales and range anxiety through parking layout, policy and regulation,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 83, pp. 63 – 73, 2016.
- [44] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, and M. A. S. Masoum, “Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, pp. 456–467, Sept 2011.
- [45] A. A. A. Al-karakchi, G. Lacey, and G. Putrus, “A method of electric vehicle charging to improve battery life,” in *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1–3, Sept 2015.
- [46] FERC, “Assessment of Demand Response and Advanced Metering – Staff Report.” 2006.
- [47] A. K. Chakraborty and N. Sharma, “Advanced metering infrastructure: Technology and challenges,” in *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T D)*, pp. 1–5, May 2016.
- [48] P. Nanda, C. Panigrahi, and A. Dasgupta, “Energy Management System in Smart Grid: An Overview,” *IJRSI*, vol. 2, pp. 31–48, 2015.
- [49] H. P. Khomami and M. H. Javidi, “Energy management of smart microgrid in presence of renewable energy sources based on real-time pricing,” in *2014 Smart Grid Conference (SGC)*, pp. 1–6, Dec 2014.

- [50] T. E. D. Liacco, "The adaptive reliability control system," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-86, pp. 517–531, May 1967.
- [51] B. Zhang, H. Sun, and W. Wu, "A new generation of ems implemented in chinese electric power control centers," in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1–3, July 2008.
- [52] N. Peck, *Peak Power Control With and Energy Management System*. PhD thesis, 2013.
- [53] M. Marzband, A. Sumper, J. L. Domínguez-García, and R. Gumara-Ferret, "Experimental validation of a real time energy management system for microgrids in islanded mode using a local day-ahead electricity market and minlp," *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 314 – 322, 2013.
- [54] F. Ye, Y. Qian, and R. Qinyang, "A Real-Time Information Based Demand-Side Management System in Smart Grid," *IEEE transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 329–339, 2016.
- [55] J. Han, C. s. Choi, and I. Lee, "More efficient home energy management system based on zigbee communication and infrared remote controls," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 57, pp. 85–89, February 2011.
- [56] O. A. Sianaki and M. A. S. Masoum, "Versatile energy scheduler compatible with autonomous demand response for home energy management in smart grid: A system of systems approach," in *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1–6, Sept 2014.
- [57] C. W. Gellings, "The concept of demand-side management for electric utilities," *Proceedings of the IEEE*, vol. 73, pp. 1468–1470, oct 1985.
- [58] P. Samadi, H. Mohsenian-Rad, R. Schober, and V. W. S. Wong, "Advanced Demand Side Management for the Future Smart Grid Using Mechanism Design," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 1170–1180, sep 2012.
- [59] G. Strbac, "Demand side management: Benefits and challenges," *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4419–4426, 2008.
- [60] M. Paulus and F. Borggrefe, "The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany," *Applied Energy*, vol. 88, no. 2, pp. 432–441, 2011.
- [61] G. Thomas and I. Shapiro-Baruch, "Bidding for Demand-side Management Performance Contracts," *Home Energy*, pp. 33–37, 1991.

- [62] A. Di Giorgio and L. Pimpinella, “An event driven Smart Home Controller enabling consumer economic saving and automated Demand Side Management,” *Applied Energy*, vol. 96, pp. 92–103, 2012.
- [63] E. Matallanas, M. Castillo-Cagigal, A. Gutiérrez, F. Monasterio-Huelin, E. Caamaño-Martín, D. Masa, and J. Jiménez-Leube, “Neural network controller for Active Demand-Side Management with PV energy in the residential sector,” *Applied Energy*, vol. 91, no. 1, pp. 90–97, 2012.
- [64] M. Castillo-Cagigal, E. Caamaño-Martín, E. Matallanas, D. Masa-Bote, A. Gutiérrez, F. Monasterio-Huelin, and J. Jiménez-Leube, “PV self-consumption optimization with storage and Active DSM for the residential sector,” *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2338–2348, 2011.
- [65] A. Haney, T. Jamasb, L. Plactchkov, and M. Pollitt, “Demand-side Management Strategies and the Residential Sector: Lesson from International Experience,” *Economic & Social Research Council, Electricity Policy Research Group*, 2010.
- [66] T. T. Cheong, *Demand Side Management Load Forecasting Based on Timetable*. PhD thesis, Universiti Tunku Abdul Rahman, 2013.
- [67] N. Gatsis and G. Giannakis, “Residential Load Control: Distributed Scheduling and Convergence With Lost AMI Messages,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1949-3053, pp. 770–786, 2012.
- [68] Y. Goswami and F. Kreith, *Energy Efficiency and Renewable Energy Handbook*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2 ed., 2016.
- [69] P. Abdullah, M. Hassan, and F. Hussin, “Demand Side Management for Reducing Rolling Blackouts Due to Power Supply Deficit in Sumatra,” *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, no. 2180-3722, pp. 39–43, 2014.
- [70] Y. Sun, S. Wang, F. Xiao, and D. Gao, “Peak load shifting control using different cold thermal energy storage facilities in commercial buildings: A review,” *Energy Conversion and Management*, vol. 71, pp. 101–114, 2013.
- [71] M. Kintner and A. Emery, “Cost Optimal Analysis and Load Shifting Potentials of Cold Storage Equipment,” in *ASHRAE Transactions*, vol. 101, pp. 539–548, 1995.
- [72] D. C. Foo, R. R. Tan, and D. K. Ng, “Carbon and footprint-constrained energy planning using cascade analysis technique,” *Energy*, vol. 33, no. 10, pp. 1480–1488, 2008.
- [73] Federal Energy Regulatory Commission, “Demand Response Measurement & Verification,” tech. rep., 2009.

- [74] A. Abdollahi, M. P. Moghaddam, M. Rashidinejad, and M. K. Sheikh-El-Eslami, “Investigation of Economic and Environmental-Driven Demand Response Measures Incorporating UC,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 12–25, 2012.
- [75] J. Blanc, B. Duretz, and A. Selle, “The Benefits of Demand Response for Utilities,” *Schneider Electric White Paper*, 2014.
- [76] M. Knight, “The Demand Response Paradox,” *CGI White Paper Series*, 2016.
- [77] A. S. Chuang and C. W. Gellings, “Demand-side Integration in a Restructured Electric Power Industry 2 From Demand-side Management to Demand-side Integration,” *CIGRE*, pp. 1–10, 2008.
- [78] U.S. Department of Energy, “Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them,” tech. rep., U.S. Department of Energy, 2005.
- [79] F. Rahimi and A. Ipakchi, “Demand Response as a Market Resource Under the Smart Grid Paradigm,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 82–88, 2010.
- [80] P. Centolella and R. McNamara, “The Future of Demand Response in RTO Energy Markets: Midwest ISO Studies on Resource Adequacy,” *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, pp. 22–33, 2006.
- [81] S. Widergren, C. Marinovici, T. Berliner, and A. Graves, “Real-time pricing demand response in operations,” in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–5, 2012.
- [82] B. Ruan, Q. Yang, X. Fang, and W. Yan, “Demand response under real-time pricing for domestic energy system with DGs,” *POWERCON 2014 - 2014 International Conference on Power System Technology: Towards Green, Efficient and Smart Power System, Proceedings*, no. Powercon, pp. 3103–3110, 2014.
- [83] J. M. Lujano-Rojas, C. Monteiro, R. Dufo-López, and J. L. Bernal-Agustín, “Optimum residential load management strategy for real time pricing (RTP) demand response programs,” *Energy Policy*, vol. 45, pp. 671–679, 2012.
- [84] K. Herter and S. Wayland, “Residential response to critical-peak pricing of electricity: California evidence,” *Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 1561–1567, 2010.
- [85] K. Herter, “Residential implementation of critical-peak pricing of electricity,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 4, pp. 2121–2130, 2007.
- [86] K. Herter, P. McAuliffe, and A. Rosenfeld, “An exploratory analysis of California residential customer response to critical peak pricing of electricity,” *Energy*, vol. 32, no. 1, pp. 25–34, 2007.

- [87] P. Mandatova, M. Massimiano, D. Verreth, and C. Gonzalez, “Network tariff structure for smart energy system,” *Eurelectric*, 2014.
- [88] P. Khajavi, H. Monsef, and H. Abniki, “Load profile reformation through demand response programs using Smart Grid,” *2010 Modern Electric Power Systems*, pp. 1–6, 2010.
- [89] A. Baitech, A. Chuang, and C. Schwaegerl, “International perspectives on demand-side integration,” *International Conference on Electricity Distribution*, no. 0914, pp. 21–24, 2007.
- [90] S. Wang, X. Xue, and C. Yan, “Building power demand response methods toward smart grid,” *HVAC&R Research*, vol. 20, no. 6, pp. 665–687, 2014.
- [91] P. Faria and Z. Vale, “Demand response in electrical energy supply: An optimal real time pricing approach,” *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5374–5384, 2011.
- [92] S. Gyamfi, S. Krumdieck, and T. Urmee, “Residential peak electricity demand response—Highlights of some behavioural issues,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 71–77, 2013.
- [93] P. Cappers, C. Goldman, and D. Kathan, “Demand response in U.S. electricity markets: Empirical evidence,” *Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 1526–1535, 2010.
- [94] S. Shao, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, “Grid Integration of Electric Vehicles and Demand Response With Customer Choice,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 543–550, 2012.
- [95] V. Martines and R. H., “Desing of Demand Response Programs in Emerging Countries,” *Power Sisstem Techonology POWERCON*, pp. 1–6, 2012.
- [96] A. Konak, D. W. Coit, and A. E. Smith, “Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial,” *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, no. 9, pp. 992 – 1007, 2006. Special Issue - Genetic Algorithms and Reliability.
- [97] Y. Tanahashi and K. L. Ma, “Design considerations for optimizing storyline visualizations,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 18, pp. 2679–2688, Dec 2012.
- [98] I. V. Sergienko, L. Hulianytskyi, and S. Sirenko, “Classification of Applied Methods of Combinatorial Optimization,” *Cybernetics and System Analysis*, vol. 45, pp. 732–741, 2009.
- [99] B. Melián, J. Moreno, and J. Moreno, “Metaheurísticas: Una visión global,” *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, vol. 7, pp. 1–23, 2003.
- [100] M. Gilli and P. Winker, “A review of heuristic optimization methods in econometrics,” *Swiss Finance Institute*, vol. 8, pp. 1–47, 2006.

- [101] M. AlRashidi and M. El-Hawary, “Applications of computational intelligence techniques for solving the revived optimal power flow problem,” *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 4, pp. 694 – 702, 2009.
- [102] Y. del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J. C. Hernandez, and R. G. Harley, “Particle swarm optimization: Basic concepts, variants and applications in power systems,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 12, no. 2, pp. 171–195, 2008.
- [103] G. Mendes, C. Ioakimidis, and P. Ferrão, “On the planning and analysis of integrated community energy systems: A review and survey of available tools,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4836 – 4854, 2011.
- [104] O. Oladeji and O. O. Olakanmi, “A genetic algorithm approach to energy consumption scheduling under demand response,” in *2014 IEEE 6th International Conference on Adaptive Science Technology (ICAST)*, pp. 1–6, Oct 2014.
- [105] R. Lugo and C. Moreno, *Optimización de un Controlador PID Basado en Metaheurísticas*. PhD thesis, Universidad Nacional Experimental del Tachira, 2015.
- [106] V. Arroyo, *Modelo de un Algoritmo Genético con Selección Discriminatoria de Individuos bajo un Esquema de Ponderación de Probabilidades de Mutación*. PhD thesis, 2013.
- [107] J. Amaya, *Modelos meméticos cooperativos para la optimización de problemas combinatorios*. PhD thesis, Universidad de Málaga, 2011.
- [108] M. Rodriguez, “Selección usando Algoritmos Genéticos,” tech. rep., 2015.
- [109] B. Miller and D. Goldberg, “Genetic Algorithms, Tournament Selection, and the Effects of Noise,” tech. rep., UIUC, 1995.
- [110] M. Srinivas and L. M. Patnaik, “Genetic algorithms: a survey,” *Computer*, vol. 27, pp. 17–26, June 1994.
- [111] J. Holland, “Adaptation in Natural and Artificial System: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Inteligence,” *University of Michigan*, p. 183, 1975.
- [112] K. A. De Jong and W. M. Spears, *An analysis of the interacting roles of population size and crossover in genetic algorithms*, pp. 38–47. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991.
- [113] G. Vaira and O. Kurasova, “Genetic Algorithm for VRP with Constraints Based on Feasible Insertion,” *Institute of Mathematics and Informatics, Vilnius University*, vol. 25, pp. 155–184, 2014.

- [114] A. Fernando, K. Morales, and J. Gutiérrez, “Penalty Function Methods for Constrained Optimization with Genetic Algorithms: A Statistical Analysis,” *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, no. 108-117, 2002.
- [115] V. Petridis, S. Kazarlis, and A. Bakirtzis, “Varying fitness functions in genetic algorithm constrained optimization: the cutting stock and unit commitment problems,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 28, pp. 629–640, Oct 1998.
- [116] J. Rasjido, D. Pandolfi, and A. Villagra, “Algoritmos de Reparación para el Manejo de Restricciones en la Planificación del Mantenimiento de Locaciones Petroleras,” tech. rep., 2010.
- [117] D. Kalyanmoy, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. 2002.
- [118] E. Zitzler and L. Thiele, *Multiobjective optimization using evolutionary algorithms — A comparative case study*, pp. 292–301. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [119] E. Zitzler and L. Thiele, “Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 3, pp. 257–271, Nov 1999.
- [120] T. Murata, H. Ishibuchi, and H. Tanaka, “Multi-objective genetic algorithm and its applications to flowshop scheduling,” *Computers and Industrial Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 957 – 968, 1996.
- [121] J. Horn, N. Nafpliotis, and D. E. Goldberg, “A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization,” in *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence*, pp. 82–87 vol.1, Jun 1994.
- [122] J. Drèze and N. Stern, “Chapter 14 the theory of cost-benefit analysis,” *Handbook of Public Economics*, vol. 2, pp. 909 – 989, 1987. Handbook of Public Economics.
- [123] F. A. Bhuiyan, A. Yazdani, and S. L. Primak, “Optimal sizing approach for islanded microgrids,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 2, pp. 166–175, 2015.
- [124] P. Giorsetto and K. F. Utsurogi, “Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, pp. 134–143, Jan 1983.
- [125] C. Moreno, G. Lozano, V. Gutiérrez, I. Hernández, E. Zamora, and O. Rodríguez, “Programación Óptima de Cargas Residenciales ante Variación de Costos en

Tiempo Real,” *international symposium on innovation and technology (ISIT)*, 2017.

[126] IESO, “Electricity Pricing,” 2017.

[127] E. Pouresmaeil, J. Gonzalez, A. Canizares, and K. Bhattacharya, “Development of a Smart Residential Load Simulator for Energy Management in Smart Grids,” *submitted IEEE Transactions on power system*, 2012.