

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Eléctrica

“Gestión de la energía para un sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico en el hogar”

Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Eléctrico

Autor:

Marlon Abel Mosquera Atariguana

CI: 0106063589

marabemosata@gmail.com

Tutor:

Ing. Julio Cesar López Quizhpi

CI: 0104047022

Cuenca, Ecuador

16/04/2021



Resumen

El trabajo de titulación establece la gestión de un sistema híbrido de baterías/sistema fotovoltaico en un hogar conectado a la red, mediante estrategias de gestión para sistemas híbridos a pequeña escala y estrategias de gestión del lado de la demanda. Además, el sistema de control incorpora la programación de electrodomésticos centrándose en optimizar tanto el despacho como el suministro de energía, buscando minimizar el consumo y costo de la electricidad, tomando en cuenta el nivel de inconveniencia que puede tener el usuario. La técnica de optimización utilizada es el algoritmo de programación no lineal de entero mixto, el cual toma en cuenta el diseño del sistema híbrido para funcionar mediante un criterio de conmutación simple. La simulación del sistema híbrido compuesto por sistema fotovoltaico y capacidad de almacenamiento conectado a la red, se hace mediante la herramienta Opti – toolbox de MATLAB.

Palabras Claves: Gestión. Optimización. Híbrido. Sistema. Conmutación. Red. Estrategias. Fotovoltaico. Baterías. Hogar.



Abstract

The current degree Project establishes the management of a hybrid system of batteries/ photovoltaic system in a home connected to the electrical system by small-scale management strategies for hybrid systems and management strategies of the demand side. Additionally, the control system incorporates the programming of home appliances focusing on optimizing the dispatch and the energy supply, searching to minimizing the consumption and cost of electricity considering the level of inconvenience that the user may have. The optimization technique used was the mixed-integer nonlinear programming algorithm, which contemplates the design of the hybrid system to function through a simple switching criterion. The simulation of the hybrid system compound by photovoltaic system and storage capacity connected to the grid executed by the tool Opti-toolbox of MATLAB.

Keywords: Management. Optimizing. Hybrid. System. Switching. Grid. Strategies. Photovoltaic. Batteries. Home.

Marlon Abel Mosquera



ÍNDICE

Resumen	2
Abstract.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
Introducción.....	13
Objetivo General.....	15
Objetivos específicos	15
Capítulo 1	16
1. Marco teórico DSM.....	16
1.1. Conceptos DSM.....	17
1.1.1. Gestión de la carga eléctrica	17
1.1.2. Conservación de la energía.....	18
1.2. Modalidades y Mecanismos DSM	19
1.2.1. Gestión de la carga eléctrica estática (SELM).....	20
1.2.2. Gestión de la carga eléctrica dinámica (DELM)	20
1.2.3. Conservación de la energía estática (SENCON)	21
1.2.4. Conservación de la energía dinámica (DENCON).....	21
1.3. Taxonomía de los métodos DSM	21
1.3.1. Gestión de la demanda estática (SDSM)	21
1.3.2. Gestión de la demanda dinámica (DDSM).....	22
1.4. Aplicaciones DSM en el hogar.....	24
1.4.1. Plan de gestión de eficiencia energética (PLANEE).....	26
1.4.2. Hogares Inteligentes HEMS	27
Capítulo 2	31
2. Los sistemas híbridos una nueva perspectiva que incorpora HEMS y DSM	31
2.1. Arquitectura y Funcionamiento de los sistemas híbridos	32
2.1.1. Fuentes de energía renovable	33
2.1.2. Fuentes de energía convencional.....	36
2.1.3. Almacenamiento de energía	36
2.1.4. Carga.....	39
2.2. Clasificación de los sistemas híbridos de energía renovable	39



2.2.1.	Clasificación según conexión de red.....	41
2.2.2.	Clasificación por método de integración.....	42
2.3.	Gestión de la energía para un sistema híbrido de energía renovable.....	44
2.3.1.	Estrategias de gestión de la energía.....	45
2.3.2.	Gestión de lado de la demanda para sistemas híbridos de energía renovable en el hogar	50
2.3.3.	Técnicas de optimización de la gestión de lado de la demanda en el hogar.....	51
Capítulo 3	57
3.	Modelamiento del sistema híbrido de baterías / sistema fotovoltaico conectado a la red.....	57
3.1.	Esquema del sistema de gestión de energía híbrido de baterías / sistema fotovoltaico conectado a la red.....	58
3.2.	Sistema fotovoltaico	60
3.3.	Banco de Baterías	60
3.3.1.	Modelamiento del estado de carga de la batería	61
3.3.2.	Modelamiento de la vida útil del banco de baterías	62
3.4.	Red eléctrica.....	63
3.5.	Cargas eléctricas	64
3.5.1.	Modelamiento para la programación de los electrodomésticos	64
3.6.	Restricciones del sistema.....	65
3.6.1.	Restricciones de capacidad del sistema.....	65
3.6.2.	Restricciones de flujo de potencia del sistema.....	67
3.6.3.	Restricciones de equilibrio de potencia	67
Capítulo 4	69
4.	Modelo de gestión óptimo para el sistema híbrido.....	69
4.1.	Modelo de Optimización	69
4.1.1.	Función de optimización para el consumo de energía	69
4.1.2.	Función de optimización para el costo de energía.....	70
4.1.3.	Función de optimización del nivel de inconveniencia del usuario	70
4.1.4.	Función Multiobjetivo.....	71
4.2.	Problema PNLEM.....	72
4.2.1.	Esquema general del problema PNLEM	72
4.2.2.	Planteamiento del problema PNLEM	73
Capítulo 5	75



5.	Análisis del sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico de energía doméstica	75
5.1.	Acotación y Clasificación de los electrodomésticos utilizados en un hogar	75
5.2.	Mediciones de consumo de los electrodomésticos.....	77
5.3.	Descripción de un hogar típico de Cuenca	84
5.4.	Características y límites de despacho del sistema híbrido baterías/ sistema fotovoltaico	86
5.4.1.	Sistema Fotovoltaico	87
5.4.2.	Sistema de Batería	87
5.4.3.	Inversor	87
5.5.	Planteamiento del problema.....	88
5.5.1.	Función Objetivo	89
5.5.2.	Restricciones del problema	90
5.6.	Simulación y Análisis.....	91
Capítulo 6	98
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	98
6.1.	Conclusiones.....	98
6.2.	Recomendaciones.....	99
Bibliografía.....		101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 - Modalidades DSM basadas en conceptos y estrategias	20
Tabla 1.2 - Aplicación de los conceptos DSM en el hogar.	25
Tabla 1.3 - Clasificación de las opciones del método DR.	29
Tabla 2.1 - Clasificación por tipo de almacenamiento de energía.....	37
Tabla 2.2 - Baterías disponibles en el mercado.....	38
Tabla 5.1 - Desagregación por uso que se le da a la energía eléctrica.....	75
Tabla 5.2 - Artefactos utilizados en un hogar	76
Tabla 5.3 - Cronograma de electrodomésticos utilizados en un hogar típico de Cuenca	84
Tabla 5.4 - Parámetros del sistema híbrido	88



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistema de energía de un hogar.....	18
Figura 1.2 - Clasificación de los métodos SDSM.....	22
Figura 1.3 - Clasificación de los métodos DDSM.....	23
Figura 1.4 - Arquitectura de un Hogar Inteligente.....	28
Figura 2.1 - Arquitectura general de un sistema híbrido a pequeña escala.....	33
Figura 2.2 - Producción bruta por tipo de energía.....	34
Figura 2.3 - Evolución de los márgenes de emisión de CO ₂ y la demanda de energía (GWh).....	35
Figura 2.4 - Combinación de diferentes tipos de sistemas híbridos de energía.....	40
Figura 2.5 - Ejemplo de BUS DC.....	42
Figura 2.6 - Ejemplo de BUS AC.....	43
Figura 2.7 - Ejemplo de BUS HÍBRIDO.....	44
Figura 2.8 - Principales características de las estrategias cuyo objetivo es asegurar la demanda.....	47
Figura 2.9 - Principales características de las estrategias cuyos objetivos incluyen factor de decisión técnica.....	48
Figura 2.10 - Principales características de las estrategias cuyos objetivos incluyen factor de decisión económica.....	49
Figura 2.11 - Principales características de las estrategias cuyos objetivos incluyen factor de decisión técnica y económica.....	50
Figura 2.12 - Clasificación de técnicas de optimización HEMS.....	52
Figura 3.1 - Disposición general del sistema eléctrico doméstico PV-BT.....	58
Figura 3.2 - Esquema del sistema de gestión de energía híbrido de baterías/ sistema fotovoltaico conectado a la red.....	59
Figura 5.1 - Registrador de energía (Parte interna).....	78
Figura 5.2 - Registrador de energía (Parte externa).....	78
Figura 5.3 - Perfil de carga de una refrigeradora.....	79
Figura 5.4 - Perfil de Carga de una secadora doméstica.....	79
Figura 5.5 - Perfil de carga de una lavadora.....	80
Figura 5.6 - Perfil de Carga de una Televisión.....	81
Figura 5.7 - Perfil de Carga de una Cafetera.....	81
Figura 5.8 - Perfil de carga de iluminación LED.....	82
Figura 5.9 - Perfil de carga de un computador portátil.....	83
Figura 5.10 - Perfil de Carga de un Calefactor.....	83
Figura 5.11 - Perfil de energía de referencia.....	85
Figura 5.12 - Perfil de generación de energía fotovoltaica.....	86
Figura 5.13 - Funciones objetivo utilizadas para la simulación del sistema híbrido.....	89
Figura 5.14 - Restricciones del problema utilizadas para la simulación del sistema híbrido.....	90
Figura 5.15 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el consumo de energía.....	91
Figura 5.16 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el costo de la energía.....	92



Figura 5.17 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el consumo de energía sin cambiar el patrón de consumo.93

Figura 5.18 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el costo de energía sin cambiar el patrón de consumo.94

Figura 5.19 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el costo de energía con un nivel de inconveniencia $\beta \leq 19$ y consumo de energía $J_e \leq 6 kWh$95

Figura 5.20 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el consumo de energía sin cambiar el patrón de consumo y sin tomar en cuenta el costo de la batería.96



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Marlon Abel Mosquera Atariguana en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“Gestión de la energía para un sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico en el hogar”**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 16 de Abril de 2021

Marlon Abel Mosquera Atariguana

C.I: 0106063589



Cláusula de Propiedad Intelectual

Marlon Abel Mosquera Atariguana, autor/a del trabajo de titulación **“Gestión de la energía para un sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico en el hogar”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 16 de Abril de 2021

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized loops and a long horizontal stroke, positioned above a solid horizontal line.

Marlon Abel Mosquera Atariguana

C.I: 0106063589



Dedicatoria

Dedico el trabajo de titulación a mi familia y en especial a mi papa Wilson Mosquera por apoyarme todo este tiempo para poder culminar con mis estudios. También lo dedico a mi hermana Belén Mosquera por ser un ejemplo de constancia en mi vida, además de siempre animarme a no rendirme y por su amor incondicional. A mi novia Mirza Ortiz por recordarme que tengo que luchar por conseguir lo que quiero y no tirar la toalla, ella ha sido una inspiración para mí, en especial, en este último paso para poder graduarme.

Marlon Abel Mosquera



Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la vida, salud y la capacidad para poder conseguir mis metas. De manera muy especial agradezco a mi papá Wilson Mosquera y a Belén Mosquera que han sido soporte, inspiración y sobre todo ancla en mi vida.

De manera muy cordial agradezco al director del trabajo de titulación el Ing. Julio López por haber confiado en mí, haber guiado correctamente el proyecto de investigación y apoyarme en todo el proceso del trabajo de titulación para finalmente poder graduarme en la prestigiosa Universidad de Cuenca.

Marlon Abel Mosquera



Introducción

La generación de energía a pequeña escala de los paneles solares es intermitente y depende de factores climáticos, en este caso de la intensidad de radiación solar que haya en el día. En consecuencia, debido a la naturaleza estocástica de la energía solar, es indispensable almacenar dicha energía mediante baterías para proporcionar energía de forma continua a través de un sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico conectadas a la red eléctrica. En general los sistemas fotovoltaicos conectados a la red sin un sistema de almacenamiento no requieren estrategias sofisticadas de gestión. En cambio, el sistema de almacenamiento presenta más desafíos para la gestión de la energía, ya que se deben considerar los escenarios de carga y descarga del sistema de almacenamiento. Por esa razón es fundamental gestionar el sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico conectado a la red de tal manera que el rendimiento del uso del sistema se mejore significativamente y la regulación de la red se pueda mejorar en términos de seguridad y eficiencia [1].

Los sistemas híbridos baterías/sistema fotovoltaico se han convertido en una opción atractiva por razones tales como el bajo costo, sin emisiones contaminantes, seguridad energética, fácil accesibilidad y reducción de combustibles fósiles. Es así que los sistemas híbridos presentan una versatilidad muy grande, al someterlos a una gestión del lado de la demanda de sus siglas en inglés DSM (Demand Side Management), los cuales pueden ayudar a los clientes a reducir el costo de electricidad, y también puede ayudar a los servicios públicos a regular la red en términos de problemas de seguridad y eficiencia, como la reducción de picos de magnitud de voltaje y el control de carga directa. En ese contexto los sistemas híbridos pueden introducir nuevas estrategias de operación en un ambiente de redes eléctricas inteligentes. [1] [2].

Hasta ahora se conoce diferentes caminos para la gestión de los sistemas híbridos baterías/sistema fotovoltaico a gran escala. Sin embargo, no existen estudios profundos con relación a la planificación óptima y DSM para sistemas híbridos a pequeña escala en el lado de la demanda, porque muchos clientes instalan sistemas híbridos para uso independiente o de respaldo sin ninguna participación del programa DSM.

Para la gestión del sistema híbridos baterías/sistema fotovoltaico que persiga los programas DSM se han seguido diferentes caminos; uno de ellos es la programación de estrategias basadas en reglas que no necesariamente logran



los resultados más óptimos. Otros métodos se han alineado en busca de un control óptimo para programar flujos de energía de sistemas híbridos con un costo mínimo y un beneficio máximo. Sin embargo, el control de flujo de potencia no es práctico para sistemas híbridos de pequeña capacidad, porque el control de potencia requiere una inversión adicional de reguladores y adaptadores costosos. Por lo tanto, se propone un modelo de conmutación simple pero práctico de sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico conectado a la red [2], el cual consiste en el control de conmutación óptima basado en estrategias DSM.

Para mejorar el DSM y minimizar el costo de electricidad de los consumidores, tanto el despacho de energía como la programación de la carga deben tenerse en cuenta simultáneamente. Por otro lado, la literatura existente sobre sistemas de energía híbridos residenciales se enfoca en minimizar el costo de electricidad de los consumidores. Sin embargo, desde el punto de vista del ahorro de energía, minimizar el consumo de energía de la red también es importante y también debe tomarse en cuenta. Por lo tanto, la administración de energía para el sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico en el hogar con incorporación de los conceptos DSM se estudia en el trabajo de titulación para ayudar a los consumidores a minimizar el gasto de energía y el consumo de energía de la red. El trabajo de Titulación también se dedica a establecer un sistema de administración de energía más favorable para aplicaciones del mundo real con consideraciones tanto a nivel técnico como económico.

El desarrollo del trabajo de titulación se compone de 5 capítulos. En el capítulo 1 se define los conceptos de la gestión de lado de la demanda (DSM) que pueden ser practicables con la ayuda de los hogares inteligentes (HEMS). El capítulo 2 trata sobre los sistemas híbridos a pequeña escala y como estos se pueden incorporar dentro de los conceptos HEMS y DSM. Más adelante en el capítulo 3 se modela matemáticamente cada una de las partes del sistema híbrido de baterías / sistema fotovoltaico; tanto la red eléctrica, el sistema fotovoltaico, el sistema de almacenamiento, las cargas eléctricas y finalmente se plantea las restricciones del sistema. En cuanto al capítulo 4, se define y aplica el modelo de optimización del sistema basado en la programación no lineal de enteros mixtos (PNLEM) del modelamiento del sistema híbrido. Finalmente, en el capítulo 5 se plantea el cronograma de consumo de electrodomésticos y el perfil de carga de un día típico en el sector residencial y se hace la simulación del sistema, con el propósito de analizar los diferentes escenarios que pueden presentarse.



Objetivo General

Gestión óptima de la energía eléctrica de un sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico conectados a la red tomando en cuenta tanto el despacho de energía como la programación de electrodomésticos.

Objetivos específicos

1. Establecer un sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico de energía domestica conectado a la red basada en una estructura de control simple.
2. Modelar el sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico conectado a la red y sus subsistemas para un control óptimo de programación no lineal de enteros mixtos de tal manera que minimice tanto el costo como el consumo de energía eléctrica.
3. Simular y analizar el sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico conectado a la red de acuerdo a los diferentes escenarios que pueden presentarse.



Capítulo 1

1. Marco teórico DSM

Cada año debido al crecimiento de la población y el desarrollo económico, el consumo de la energía eléctrica aumenta, por lo que es indispensable satisfacer la demanda de energía. Para conseguir esto, se pueden tomar dos caminos distintos: El primero es creando nuevas generadoras eléctricas para satisfacer la creciente demanda de carga; la segunda opción rechaza el aumento de la oferta de energía en respuesta al crecimiento de la demanda de carga y tiene como objetivo mantener la parsimonia en el sector energético. El concepto DSM nace precisamente de esta segunda opción para implementar las medidas de gestión para producir los recursos del lado de la demanda al influir en la demanda de carga. El propósito de la gestión de la energía (DSM) es cuidar del medio ambiente mitigando los gases de efecto invernadero, donde el principal objetivo es la adecuación del suministro eléctrico a la demanda. Para ello la estrategia que se persigue es la reducción del consumo y la mejora de la eficiencia. En la interacción que existe entre la empresa de distribución de energía y los consumidores de energía hay la oportunidad de usar de forma óptima la energía eléctrica tomando medidas de ambas partes. Si bien DSM abarca una perspectiva amplia, en donde, los gobiernos son los principales impulsores, para que mediante leyes e incentivos el consumidor pueda interactuar adecuadamente en el sistema eléctrico [3]. Actualmente han surgido nuevos mecanismos en donde los consumidores de los diferentes sectores de energía pueden ser partícipes para cumplir con los objetivos DSM. De ello nacen nuevos conceptos y modalidades que pueden ser integradas para aplicarlas tanto en el sector residencial, comercial e Industrial. Sin embargo, se centra la atención en el sector residencial para definir los conceptos DSM que pueden ser aplicables.

Hay que tener presente que definir la gestión de la energía (DSM) no es tarea fácil, ya que, han ido surgiendo a través de los años nuevas estrategias y mecanismos, los cuales hacen que el tema de la gestión sea complejo, pasando a través de los años desde una perspectiva básica a una perspectiva compleja y robusta. El hecho de que ahora se hablen de redes inteligentes, hogares inteligentes y generación distribuida causa un cambio en la forma de ver a la gestión del lado de la demanda. Un artículo titulado: “A review of demand-side management: Reconsidering theoretical framework” de la revista *Renewable and Sustainable Energy Reviews* hace una recapitulación del marco teórico DSM, dando una clasificación de las modalidades, estrategias y mecanismos; permitiendo así tener un cuadro completo de los conceptos y



definiciones DSM [4]. El desarrollo de este capítulo se basa en dicha revista para poder definir adecuadamente los conceptos DSM que pueden ser aplicables en el sector residencial.

1.1. Conceptos DSM

El tema del trabajo de titulación es la gestión de la energía de un sistema híbrido de baterías/ sistema fotovoltaico en el hogar, el cual, se fundamenta en los conceptos DSM. Por lo que, surge una pregunta: ¿Qué conceptos DSM son practicables en el sector residencial?

Existen dos conceptos DSM que son aplicables en el sector residencial, desde el punto de vista de la interacción entre las empresas de distribución y el consumidor:

- 1) Gestión de la carga eléctrica
- 2) Conservación de la energía

1.1.1. Gestión de la carga eléctrica

ELM de sus siglas en inglés '*electrical load management*' que en español se traduce gestión de la carga eléctrica, es el primer concepto que se introduce en los años setenta en la teoría DSM. [5] Definido como la planificación, implementación y supervisión de los dispositivos y programas de la empresa de servicios para influir en la utilización de la energía eléctrica que resulta en cambios deseados en el patrón del consumo de los clientes. Las formas clásicas ELM han sido: el recorte de picos, el llenado de valles y el desplazamiento de carga y las tres formas modernas han sido el crecimiento de carga estratégico, la conservación estratégica y la forma de carga flexible.

La primera definición científica de ELM ha sido presentada por el "Grupo de trabajo de gestión de carga del Subcomité de planificación de sistemas del Comité de ingeniería eléctrica", la cual menciona que la gestión de carga es la influencia intencional de los clientes para cambiar el tiempo de uso de la electricidad [6].

1.1.2. Conservación de la energía

La conservación de la energía (ENCON) de sus siglas en inglés 'Energy Conservation' involucra las medidas aplicadas para el uso final que se da a la energía para influir en la calidad de la actitud del consumo de energía que se puede caracterizar por índices técnicos. El principal objetivo es la reducción de la pérdida de energía de un sistema energético. Entendiendo como "sistema de energía" a un proceso industrial, un equipo de un proceso o un aparato que consume energía y proporciona algunos servicios [4]. El esquema de un sistema de energía se puede ver en la figura 1.1, viendo a la casa doméstica como un sistema que consume energía de la red y la utiliza para diferentes fines; iluminación, fuerza electromotriz, cocción, calentamiento de agua, entre otras cosas y dependiendo la eficiencia del sistema, se puede estimar el consumo de un hogar. Un sistema de energía implica una entrada llamada 'energía terminal', una salida llamada 'energía útil' y pérdidas de energía.

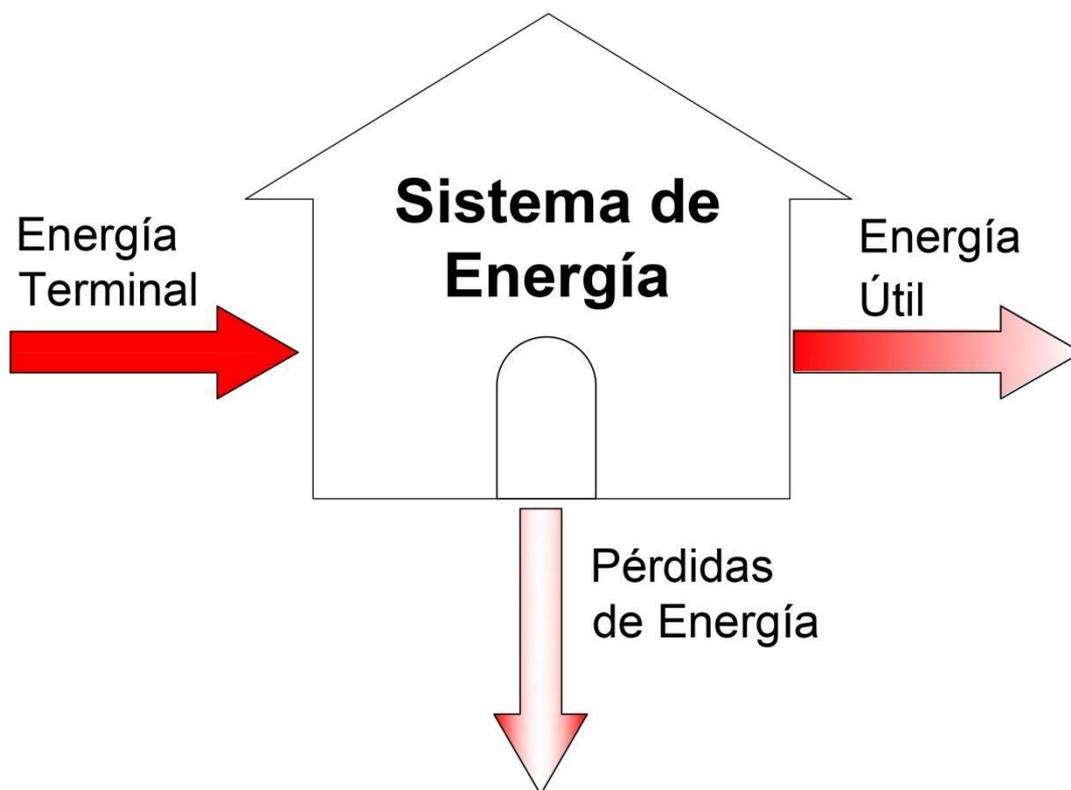


Figura 1.1 - Sistema de energía de un hogar [4].

1.1.1.1. La energía terminal o neta (E_t). - se define como la energía disponible para su uso después de restar las pérdidas de distribución y las cantidades almacenadas. Los clientes pagan sus facturas debido a la utilización de energía terminal [4].



1.1.1.2. La energía útil (E_u). - se define como la energía necesaria para realizar un trabajo. En la práctica se utiliza para lograr los servicios energéticos como calefacción, iluminación, fuerza motriz, entre otros.

La energía útil obtenida de una determinada energía terminal depende de la eficiencia del sistema.

Eficiencia del sistema:

$$\eta = \frac{E_u}{E_t} \quad (1.1)$$

1.2. Modalidades y Mecanismos DSM

El principal objetivo DSM es la adecuación del suministro eléctrico a la demanda. Para lograr este objetivo, existen dos estrategias diferentes:

1. Reducción del consumo
2. Mejora de la eficiencia

En consecuencia, DSM se clasifica en dos modalidades denominadas 'DSM estático (SDSM)' y 'DSM dinámico (DDSM)', respectivamente [4].

Como ya se analizó DSM está basado en dos conceptos; gestión de la carga eléctrica (ELM) y la conservación de energía (ENCON). Estos conceptos se pueden transponer con las estrategias de reducción de consumo y mejora de la eficiencia. Formándose de esta manera, las modalidades que se muestran en la tabla 1.1.



Tabla 1.1 - Modalidades DSM basadas en conceptos y estrategias

Estrategias	Conceptos		Modalidades
	ELM	ENCON	
Reducción del consumo	SELM	SENCON	SDSM
Mejora de la eficiencia	DELM	DENCON	DDSM

1.2.1. Gestión de la carga eléctrica estática (SELM)

SELM se refiere a las medidas y actividades que tienen como objetivo reducir el consumo eléctrico al modificar el patrón de consumo o el tiempo que se usa la energía eléctrica. Esta modalidad abarca dos mecanismos:

- Conservación estratégica. - Disminución de la carga estimulada por la utilidad para modificar la forma de carga.
- Forma de carga flexible. - Cambio de carga basado en confiabilidad.

1.2.2. Gestión de la carga eléctrica dinámica (DELM)

Involucra las medidas y actividades que tienen como objetivo mejorar la eficiencia eléctrica al realizar cambios en la curva de carga. El factor de utilización (F_u) es el índice principal para describir la utilización del uso de la energía. Una gran diferencia entre los consumos pico y no pico resulta en grandes pérdidas económicas de inversión y generación en el sistema eléctrico. Los mecanismos que solucionan esto son los siguientes:

- Recorte de picos. - reducción de la carga máxima del sistema.
- Relleno de Valle. - Construcción de cargas fuera de las horas pico.
- Cambio de carga. - Cambio de cargas de periodos de hora pico a periodo de horas valle.
- Crecimiento estratégico de la carga. - Incremento de la carga estimulado por la utilidad.



1.2.3. Conservación de la energía estática (SENCON)

Se basa en la conservación de la energía a través del control de energía terminal con el objetivo de reducir el consumo de energía. Los mecanismos son:

- Auditoría energética. - Medidas que disminuyen las pérdidas de energía bajo energía útil definida y sin cambios, sin la responsabilidad directa del cliente.
- Ahorro energético. - Medidas que disminuyen las pérdidas de energía bajo una eficiencia energética definida y sin cambios.

1.2.4. Conservación de la energía dinámica (DENCON)

Se basa en la conservación de la energía a través del control de la eficiencia energética con el objetivo de mejorar la eficiencia. Los mecanismos son:

- Auditoría energética. - Medidas que disminuyen las pérdidas de energía bajo energía útil definida y sin cambios, con la responsabilidad directa del cliente.
- Recuperación de energía. - Tiene que ver con la productividad de un sistema al mejorar la eficiencia de un sistema bajo una energía terminal definida y sin cambios.

1.3. Taxonomía de los métodos DSM

1.3.1. Gestión de la demanda estática (SDSM)

Tiene como objetivo equilibrar la energía mediante el control del consumo de energía. SDSM comprende las políticas y actividades para alentar a los usuarios finales a cambiar su patrón normal del consumo de energía, pero la implementación completa de estos métodos depende eventualmente de la voluntad de los clientes. Además, los clientes no tienen ninguna responsabilidad en SDSM, pero la motivación puede crearse a través de una gestión estática; como programas educativos y anuncios. El objetivo se fija generalmente en la reducción del costo de energía para los usuarios finales en condiciones fuera de servicio.

1.3.1.1. Clasificación de métodos SDSM

Con la finalidad de tener un cuadro completo de las modalidades que toma DSM, es necesario una clasificación de los métodos SDSM. En la figura 1.2 se aprecia un cuadro sinóptico de estas modalidades, en las que SDSM se clasifica en SELM y SENCON.

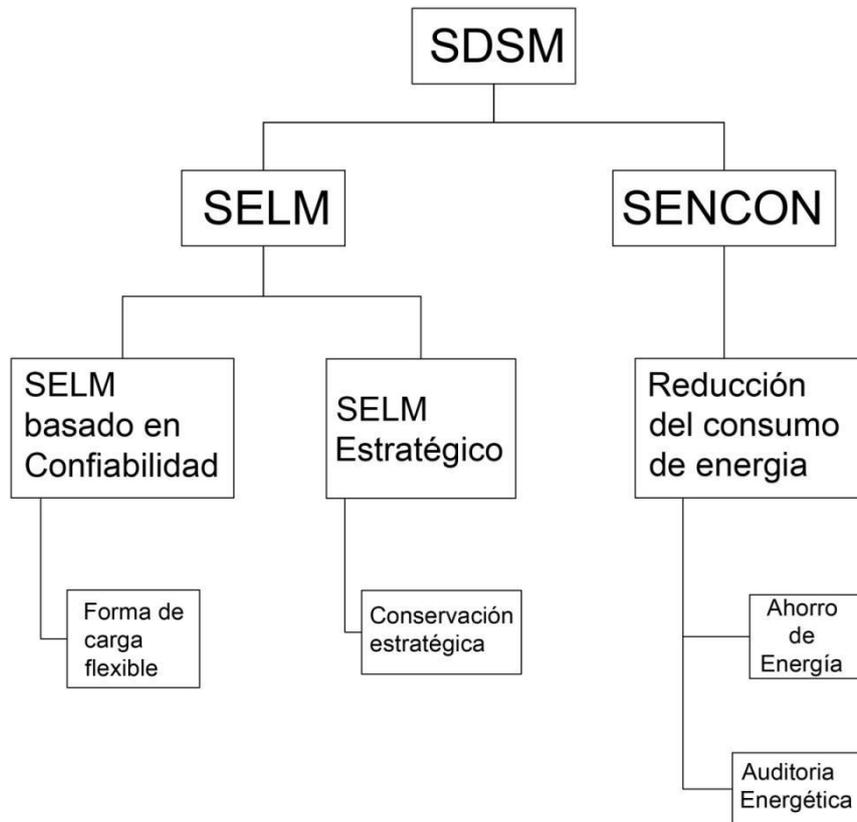


Figura 1.2 - Clasificación de los métodos SDSM [4].

1.3.2. Gestión de la demanda dinámica (DDSM)

El DDSM implica las medidas de gestión para predisponer la implementación de programas que hagan que los clientes finales sean responsables de una actitud adecuada. La principal característica de DDSM es la definición de conceptos y métodos considerando la responsabilidad de los clientes.

1.3.2.1. Clasificación de métodos DDSM

Los métodos DDSM se dividen en dos grupos generales que incluyen 'DELM' Y 'DENCON'. La clasificación de DDSM del marco teórico DSM se puede ver en la figura 1.3.

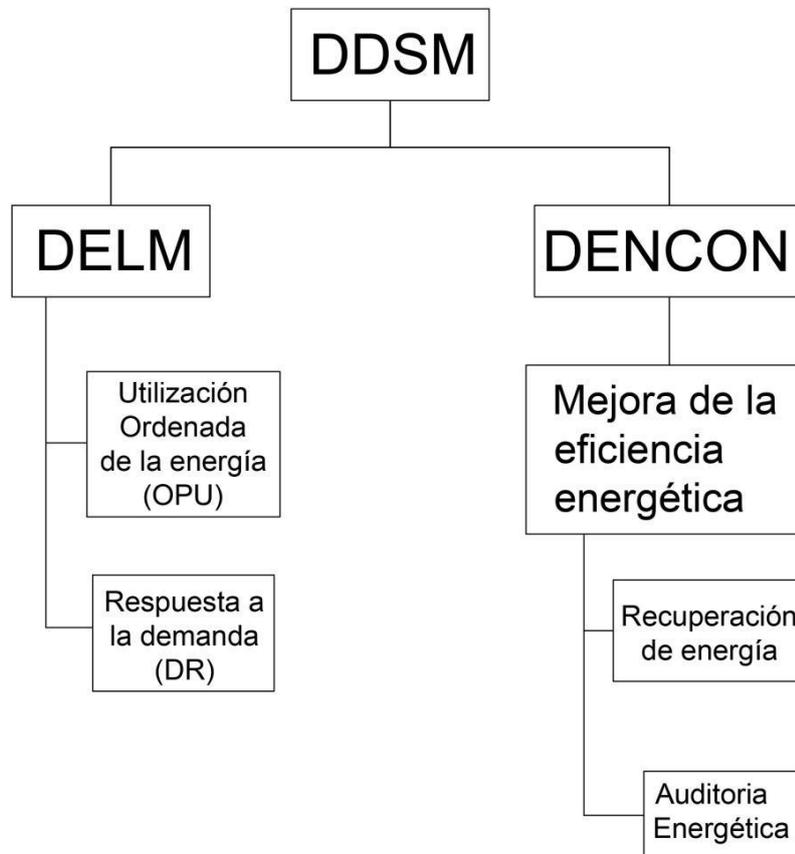


Figura 1.3 - Clasificación de los métodos DDSM [4]

1.3.2.1.1. Métodos DELM

Existen dos tipos de DELM: La utilización ordenada de la energía (OPU) y la respuesta a la demanda (DR). Tanto DR como OPU siguen los objetivos ELM, así como un conjunto de objetivos de operación del sistema de energía. El DELM ha sido sometido a una transición de medidas administrativas OPU a medidas de mercado DR. Básicamente, OPU puede considerarse como DELM no basado en el mercado y DR puede considerarse como DELM basado en el mercado.



Métodos OPU

La Utilización ordenada de la energía OPU se refiere a las medidas de gestión considerando la responsabilidad de los clientes sin la interacción del mercado. OPU se define como la regulación de la demanda de carga mediante la adopción de medidas administrativas, económicas, tecnológicas y de otro tipo que llevan a los clientes a utilizar eficazmente la electricidad a través de garantizar el suministro eléctrico en condiciones críticas tales como escasez de energía eléctrica o cuando la confiabilidad se ve comprometida. El propósito principal de OPU es el equilibrio de la oferta y la demanda de energía y el encuentro de eventos.

Método DR

La respuesta a la demanda DR se refiere al cambio en el patrón de consumo en respuesta a un estimulador que motiva a los consumidores finales. Desde el punto de vista del cliente, los estimuladores, son aquellos que reducen el precio de la factura del consumo mensual de electricidad. Para que los clientes, acepten los programas DR hay dos factores efectivos que pueden motivarlos: el primer factor es el cambio en el precio de la electricidad y el segundo factor son los esquemas de incentivos para llevar a los clientes a reducir el consumo en condiciones críticas. El hecho de que los consumidores finales no se enfrenten a los precios al contado de la electricidad genera una falta de eficiencia de los recursos de energía eléctrica, ya que, se forma una diferencia entre el precio de la electricidad al por mayor y los pagos de los clientes finales, por lo que los consumidores no tienen el estímulo suficiente para alterar sus patrones de consumo.

1.4. Aplicaciones DSM en el hogar

El gobierno es el principal promotor de que se cumplan las medidas de la gestión de la demanda DSM en el sector residencial. Para que las empresas de distribución puedan interactuar adecuadamente con el consumidor final, es indispensable políticas que permitan pasar de la teoría a la práctica, en lo que se refiere a los conceptos DSM. Si bien, muchos conceptos de la gestión de la demanda han sido aplicados en varios países, en Ecuador se ha limitado a una forma de gestión estática de la demanda SDSM, ya que, las leyes no han fijado



un compromiso con el consumidor del sector residencial, impidiendo aplicar todas las medidas expuestas en la sección 1.2.

En el sector residencial las aplicaciones DSM son varias. De acuerdo a las 4 modalidades analizadas en la sección 1.2 se pueden aterrizar los conceptos DSM aplicables en el hogar. En la tabla 1.2 se puede apreciar esto junto con la acción específica que se está haciendo en la actualidad y se puede hacer en un futuro también.

Tabla 1.2 - Aplicación de los conceptos DSM en el hogar.

Gobierno	Modalidades	Mecanismos	Aplicación
Sin imposición	SELM	Conservación estratégica	Programación de electrodomésticos para minimizar consumo, mediante hogares inteligentes sin participación DR.
		Forma de carga flexible	Mediante guías de uso eficiente de la energía eléctrica cambiar los hábitos de consumo del usuario.
	SENCON	Ahorro de energía	Diseños arquitectónicos de casas que mejoran la eficiencia eléctrica en un hogar.
		Auditoria energética	Campañas para el uso de electrodomésticos de etiquetado tipo A.
Con imposición	DELM	Utilización Ordenada de la energía (OPU)	Cortes de energía eléctrica.
		Respuesta a la demanda (DR)	Respuesta a la demanda DR mediante los hogares inteligentes, al interactuar con los precios de la electricidad para lograr minimizar costo de energía.
	DENCON	Recuperación de energía	Leyes que obliguen hacer una mejora en la productividad energética en un hogar. Programa de eficiencia energética para cocción por inducción y calentamiento de agua con electricidad.
		Auditoria energética	Ley de eficiencia energética que obligue al usuario residencial tomar medidas de uso eficiente de la energía.

La aplicación de los conceptos DSM en el hogar pueden ser estáticas o dinámicas. Las modalidades estáticas son las que hasta el momento han



funcionado en el Ecuador, mediante el Plan de Eficiencia Energética (PLANEE), en donde no se han dictaminado ninguna imposición al consumidor para que se involucre en los proyectos, pero si a dispuesto una “guía de eficiencia energética de la energía eléctrica en el Ecuador” [7] y publicidad e incentivos para que la gente se motive a ser parte de los proyectos al reducir su costo mensual de energía. No obstante, las modalidades dinámicas DDSM que tienen que ver con imposiciones para el consumidor residencial, prácticamente no se han plasmado hasta el momento.

Desde el punto de vista del consumidor residencial se habla de dos caminos generales que han ayudado y pueden ayudar a que se apliquen los conceptos DSM:

- PLANEE
- Hogares inteligentes

1.4.1. Plan de gestión de eficiencia energética (PLANEE)

El plan de eficiencia energética PLANEE establecido en el Ecuador por parte del ministerio de electricidad y energía renovable MEER ha desarrollado proyectos para incentivar el uso eficiente de la energía en el sector residencial, mediante instrumentos regulatorios, incentivos fiscales y tributarios [8]. Al hablar de uso de eficiencia energética, PLANEE no solo se refiere a energía eléctrica, sino también otros energéticos como son la gasolina, gas licuado de petróleo, diésel y otros. No obstante, en un hogar las medidas, de parte del gobierno, que se han tomado para mejorar el uso eficiente de la energía; tienen que ver también, con el uso eficiente de la energía eléctrica, por lo que los proyectos de PLANEE entran dentro de los conceptos DSM, que siendo específicos se ubican en la modalidad SENCON, en lo que se refiere a mecanismos de auditoría energética. Los proyectos que se han realizado son los siguientes:

- 1.4.1.1. Reconversión tecnológica en iluminación residencial.** - Mediante esta iniciativa, de 2008 a 2014 se realizó la sustitución de 16 millones de focos incandescentes por focos ahorradores, en los sectores Residencial, Artesanal y en entidades del sector Público, lo que representó aproximadamente tres millones de abonados beneficiados. Esta iniciativa desarrollada por MEER impulsó la resolución de la Secretaría de Comercio Exterior (COMEX), que suspendió la importación de focos incandescentes de uso residencial, entre los rangos de 25 a 100 W, a partir de enero de



2010. Esta medida logró una reducción estimada de 287000 MWh/año y 263 MW de potencia.

1.4.1.2. Programa para la renovación de equipos de consumo energético ineficiente. - La sustitución de electrodomésticos ineficientes fue un proyecto que se realizó en el periodo 2012 – 2016, en el que se sustituyeron 95652 refrigeradoras a nivel nacional, por equipos nuevos y eficientes fabricados en Ecuador, permitiendo una reducción aproximada de 38200 MWh/año de electricidad y 5,53 MW de potencia.

1.4.1.3. Programa de eficiencia energética para cocción por inducción y calentamiento de agua con electricidad (PEC). - Este programa que inició en el 2014, tiene como objetivo sustituir el uso de GLP por electricidad para la cocción de alimentos y el calentamiento de agua en el sector residencial. A finales del año 2016, 579637 familias confiaron en el programa y se beneficiaron del incentivo tarifario. De éstas, 80% obtuvo financiamiento del Estado para la adquisición de cocinas de inducción. Esta medida dentro de los conceptos DSM se categoriza como modalidad DENCON, ya que, al reemplazar cocina normal a Gas por cocinas de inducción, mejora la productividad del hogar, visto como un sistema energético. Por ejemplo, para cocinar un alimento, el tiempo que le toma a una cocina a gas es mayor que el tiempo de una cocina de inducción, es decir, aunque la energía que se utilice al cocinar es la misma, el hecho de que en el segundo caso se demore menos, es porque la cocina de inducción aprovecha mejor la energía que una cocina a gas.

1.4.2. Hogares Inteligentes HEMS

Los hogares inteligentes se definen como el sistema óptimo que proporciona servicios de gestión de la energía para controlar de forma eficiente la generación, el almacenamiento y el consumo de electricidad en las casas inteligentes [9].

La arquitectura de un hogar inteligente (figura 1.4) está compuesta por un controlador inteligente centralizado para proporcionar al propietario módulos de monitoreo y funciones de control basadas en la red de comunicación doméstica.

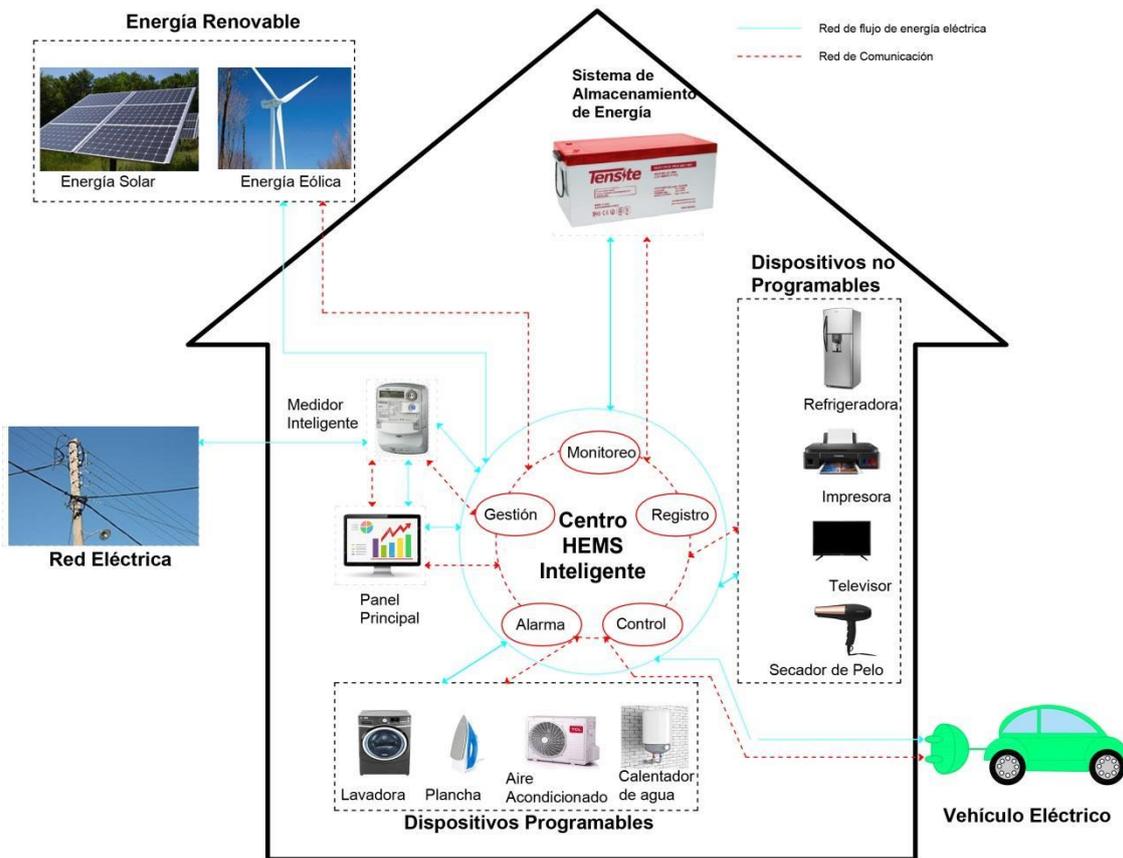


Figura 1.4 - Arquitectura de un Hogar Inteligente [9].

1.4.2.1. Funcionalidades de HEMS

La funcionalidad de HEMS se articula en 5 partes: 1) Monitoreo, 2) Registro, 3) Control, 4) Alarma, y 5) Gestión. Cada una de estas partes ofrece diferentes servicios dentro de un hogar, permitiendo que se pueda administrar la energía eléctrica de forma óptima.

1.4.2.2. Infraestructura HEMS

La infraestructura HEMS se compone de un centro HEMS inteligente, contadores inteligentes, sistemas de comunicación, programación de electrodomésticos y otros dispositivos inteligentes. Con esta infraestructura HEMS puede acceder, monitorear, controlar y optimizar el desempeño de varios electrodomésticos, de los sistemas de almacenamiento y los sistemas



híbridos de recursos renovables. Además, HEMS es capaz de integrar electrodomésticos inteligentes e interactuar con otros hogares inteligentes en la participación bidireccional de los usuarios y las empresas de energía eléctrica.

Básicamente en los hogares inteligentes se pueden aplicar los conceptos de respuesta a la demanda del mercado de energía, los cuales se dividen en dos tipos: respuesta a la demanda basada en precio y respuesta a la demanda basada en incentivos. En la tabla 1.3 se puede apreciar las diferentes opciones que presenta este método.

Tabla 1.3 - Clasificación de las opciones del método DR [9].

Esquemas	Opciones	Descripciones Funcionales
Respuesta a la demanda basada en precios	Precios por tiempo de uso (TOU)	Un modelo de fijación de tarifas en el que los precios de la efectividad varían con el tiempo, generalmente diseñado en un día de 24 horas.
	Precios en tiempo real (RTP)	Un esquema de precios en el que el precio de la electricidad suele fluctuar cada hora lo que refleja cambios en el precio mayorista de la electricidad.
	Precios máximos críticos (CPP)	Una estrategia de precios de la electricidad se determina de antemano en las horas pico de un día crítico.
Respuesta a la demanda basada en incentivos	Control de carga directo (DLC)	Con el fin de resolver el problema de confiabilidad o la emergencia regional en los sistemas de energía, el operador del programa apaga o cicla remotamente el equipo eléctrico de un cliente con poca antelación.
	Carga interrumpible (IL)	Reducir o interrumpir la participación de carga en situaciones de emergencia del sistema.
	Ofertas del lado de la demanda (DSB)	Los clientes ofrecen ofertas de reducción basados en los precios del mercado de electricidad al por mayor a un equivalente.
	Respuesta a la demanda de emergencia (EDR)	Proceso de acción de confiabilidad del sistema causado por el riesgo operativo de la red, cortes de energía, apagones, etc.
	Programas de capacidad/ servicios auxiliares	Lidiar con la falla del generador, la falla de línea de transmisión y otros accidentes del sistema causado por la capacidad limitada. También puede participar en el control de voltaje, regulación de frecuencia y la reserva de los recursos del lado de la demanda.



En Ecuador el método DR no aplica, debido a que en el sector residencial el precio de la energía es fijo [10]. No obstante, con la ayuda de los hogares inteligentes se puede optimizar el consumo y costos de la energía, gracias a los sistemas de almacenamientos de energía, sistemas híbridos de energía renovable y la programación de los electrodomésticos. Por lo que el concepto DSM dejarían de ser dinámicos y se convertirían en medidas estáticas SDSM, los cuales van acorde con los mecanismos SELM y SENCON. En capítulos posteriores se muestra como al minimizar consumo de energía mediante la programación de electrodomésticos y gestión del sistema híbrido se puede aplanar la curva de carga y al mismo tiempo ahorrar energía, con un incentivo autogenerado por el propio sistema que es minimizar costo y consumo de energía.



Capítulo 2

2. Los sistemas híbridos una nueva perspectiva que incorpora HEMS y DSM

Los sistemas híbridos a pequeña escala se han convertido en una opción atractiva por razones tales como el bajo costo, sin emisiones contaminantes, seguridad energética, fácil accesibilidad y reducción de combustibles fósiles. Es así como los sistemas híbridos presentan una versatilidad muy grande, al someterlos a una gestión del lado de la demanda DSM, los cuales pueden ayudar a los clientes a reducir el costo de electricidad, y también puede ayudar a los servicios públicos a regular la red en términos de problemas de seguridad y eficiencia, como la reducción de picos de magnitud de voltaje y el control de carga directa. En este contexto los sistemas híbridos pueden introducir nuevas estrategias de operación en un ambiente de redes eléctricas inteligentes. [1]

La gestión de la energía es el tema más importante en los hogares inteligentes HEMS para mejorar la optimización y la eficiencia del uso de la energía [9]. Para ello, son indispensables los sistemas híbridos, compuestos por diferentes fuentes de energía renovable, la red eléctrica, además del sistema de almacenamiento y el control de electrodomésticos. Sin los sistemas híbridos los hogares inteligentes difícilmente se podrían someter a las estrategias DSM, ya que, al administrar y utilizar nuevas fuentes de energía se posibilita la opción de generar autonomía energética en el hogar y al mismo tiempo poder optimizar los procesos de despacho y demanda. No obstante, la arquitectura e infraestructura de los hogares inteligentes es robusta, compone muchas más aristas que por el momento más que una realidad es un concepto de la aplicación de DSM en los hogares, que en un futuro se espera sea una realidad. Hasta el momento existen estudios experimentales de casas inteligentes, pero que no se han vuelto una opción práctica por el tema del costo y complejidad [11] [12]. Por otro lado, están los sistemas híbridos a pequeña escala, que son menos robustos y accesible desde un punto de vista económico. Todo esto ha permitido que los sistemas híbridos se vuelvan una nueva perspectiva que persiga los conceptos DSM y HEMS.

Definiendo un sistema híbrido de energía renovable (SHER) se podría decir que es una combinación de fuentes de energía renovable con o sin fuentes de energía convencionales, que funcionan en modo autónomo o conectados a la red [13], ya que debido a la estacionalidad, variabilidad y periodicidad de las fuentes de energía renovable una sola fuente de energía no es suficiente y por ende es necesario usar más fuentes de energía como la solar, eólica,



geotérmica, entre otras, para un adecuado suministro de energía eléctrica que sea continua y económico en el hogar [9]. Además, hay que tomar en cuenta que las fuentes de energía renovable son de naturaleza estocástica, en especial la energía solar y eólica, esto impide que se tenga un suministro de energía estable, por lo que es indispensable el uso de baterías para almacenar la energía y utilizarla en un momento conveniente. Así también para mejorar la confiabilidad del sistema híbrido se puede utilizar fuentes de energía convencional como generadores de diesel, o conectado a la red eléctrica. Todo esto permite que se formen diferentes escenarios que pueden presentar ventajas si se las administra adecuadamente para optimizar el costo y consumo de energía.

2.1. Arquitectura y Funcionamiento de los sistemas híbridos

Un sistema híbrido (SHER) está compuesto por varias partes (figura 2.1). Por un lado, tenemos las fuentes de energía renovable, por otro las fuentes de energía convencional, el almacenamiento de energía y finalmente la carga eléctrica. Cada una de estas partes interactúa en un sistema de control que cumple la función de despacho y suministro de energía. La idea es administrar la energía obtenida por las fuentes de energía renovable y convencional, de tal manera que se cumpla con las estrategias DSM con el fin de generar cierta autonomía energética para el consumidor residencial y una ventaja económica que permita incentivar al usuario en el uso de sistemas híbridos.



Figura 2.1 - Arquitectura general de un sistema híbrido a pequeña escala.

2.1.1. Fuentes de energía renovable

En los últimos años el uso de fuentes de energía renovable (FER) ha ido en aumento debido a la necesidad de cuidar del medio ambiente, ya que, en el pasado la energía eléctrica provenía de energía fósil. Por esa razón, resulta una responsabilidad usar las FER con la premisa de reducir las emisiones de dióxido de carbono para satisfacer la creciente demanda de energía. La ventaja de las FER es que se pueden obtener de la naturaleza, utilizar y reciclar continuamente. Actualmente son la fuente de energía alternativa más prometedora debido a sus características ricas y limpias. Esto ha hecho que muchos países tomen medidas al respecto para incrementar su capacidad instalada de fuentes de energía renovable [14]. Las capacidades instaladas acumuladas de diferentes fuentes de energía renovable (energía hidroeléctrica, energía solar, energía eólica, bioenergía, energía marina y energía geotérmica) en el mundo, indican que los recursos de energía solar y eólica tienen la tasa de crecimiento más rápida en comparación con otras fuentes de energía renovable [14]. Por ejemplo, en Ecuador se ha promulgado muchas políticas de incentivos para las FER promoviendo en gran medida su desarrollo y utilización. La generación de energía bruta producida por fuentes renovable y no renovable corresponden a 21224,31 GWh, 72,58%; y, 8019,28 GWh, 27,42% respectivamente (figura 2.2) [15]. Además, los proyectos de energía renovable hechos en Ecuador han permitido la reducción de las emisiones de

Gases de Efecto Invernadero (GEI) [15]. En la figura 2.3 se puede observar como a pesar del aumento de la demanda eléctrica del periodo 2011 a 2018 en Ecuador, se ha podido disminuir las emisiones de CO₂ al ambiente. Esta reducción de las emisiones de CO₂ se debe a la entrada de grandes centrales hidroeléctricas en reemplazo de generación térmica y para satisfacer la creciente demanda eléctrica del país [15]. No obstante, el uso de una sola fuente de energía a menudo conduce a un tamaño excesivo del sistema debido a la aleatoriedad y la intermitencia de algunas FER, como la energía solar y eólica [16]. Este fenómeno aumenta el costo capital y dificulta la confiabilidad del sistema [17]. En consecuencia, es necesario el uso de sistemas híbridos para integrar las FER y otras fuentes de energía no renovable, junto con almacenamiento de energía para contrariar los obstáculos desafiantes e inevitables.

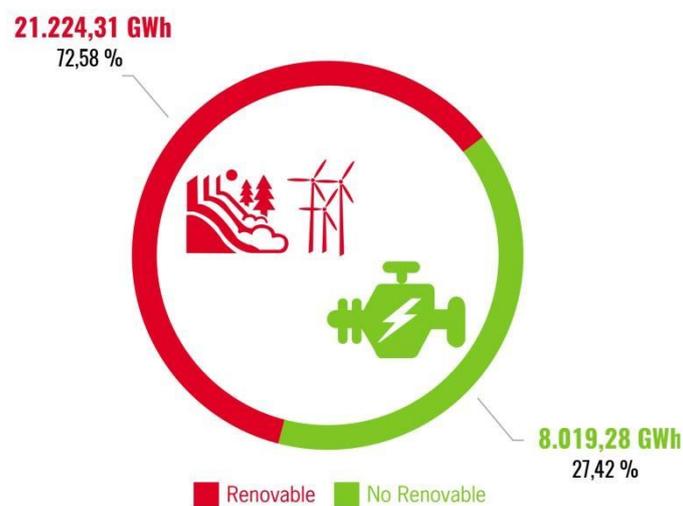


Figura 2.2 - Producción bruta por tipo de energía [15].



Figura 2.3 - Evolución de los márgenes de emisión de CO₂ y la demanda de energía (GWh) [15].

La energía solar y eólica son las fuentes renovables más utilizadas a pequeña escala junto con los sistemas de almacenamiento [18]. El uso de paneles solares garantiza la generación durante las horas de sol con un margen de predicción aceptable. Los aerogeneradores tienen un comportamiento estocástico, esto provoca una generación impredecible, por lo que es necesario el aprovechamiento óptimo del resto de elementos para garantizar el equilibrio de potencia. Por otro lado, la generación eólica está disponible durante todo el día, intensificada durante la noche. Las turbinas eólicas requieren un emplazamiento y unas condiciones medioambientales especiales, por lo que se utilizan menos. De acuerdo con lo anterior, la hibridación de paneles solares y turbinas eólicas se considera una solución aceptable para generar energía a partir de fuentes renovables [19]. Los consumidores residenciales como parte importante de los consumidores de electricidad están cambiando de usuarios pasivos de energía a productores activos de energía a pequeña escala [20]. Además, debido a la reducción del coste de los paneles solares en muchos países, las instalaciones solares en tejados en complejos residenciales de todo el mundo han experimentado un crecimiento exponencial [21]. En el Ecuador, por ejemplo, de acuerdo a la regulación 003/18 de ARCONEL, se establece las condiciones para el desarrollo, implementación y participación de consumidores que cuenten con sistemas de microgeneración fotovoltaica hasta 100 kW de capacidad nominal instalada, ubicados en techos, superficies de vivienda o en edificaciones para las categorías residencial y general determinados en el pliego tarifario de bajo o medio voltaje. Sin embargo, dicha regulación, no prohíbe el uso de energía renovable independiente en un hogar.



El acoplamiento de almacenamiento de energía, como la batería, con un componente fotovoltaico de producción de energía renovable, permite aprovechar la flexibilidad en la gestión temporal de la energía durante diversas condiciones de funcionamiento. El exceso de energía puede ser almacenado por la batería y cualquier defecto del panel solar durante condiciones climáticas indeseables se compensa con la energía almacenada de la batería conectada. Por otro lado, el sistema se puede interconectar con la red para un control óptimo de la energía [22]. La incorporación tanto del sistema fotovoltaico como el sistema de almacenamiento se hace desde un sistema de control que permita gestionar adecuadamente la energía, dando lugar a un sistema híbrido a pequeña escala.

2.1.2. Fuentes de energía convencional

Las fuentes de energía convencional (figura 2.1), cumplen la función de respaldar al sistema híbrido de energía eléctrica requerida en el hogar, ya que, debido a la naturaleza estocástica de las FER es necesaria la confiabilidad en el sistema híbrido. Los generadores diesel se utilizan normalmente en lugares remotos, en donde, no hay servicio de energía eléctrica, estos garantizan la confiabilidad del sistema en condiciones climáticas extremas y mejoran la economía del sistema [14]. Algunas áreas remotas, donde los clientes solían depender de sistemas híbridos independientes para generar energía, se están conectando a la red como parte de la actualización de la red. Ahora, un nuevo problema es cómo utilizar eficientemente dicho sistema instalado a pequeña escala. El generador a diesel en ese caso se excluye, ya que la energía que genera es menos ecológica y más costosa que la red. Además, se considera poco realista lograr un funcionamiento 100% fuera de la red porque requiere que el sistema fotovoltaico y el sistema de las baterías tengan un gran tamaño [21]. La ventaja de un sistema híbrido de energía renovable a pequeña escala conectado a la red es que puede incorporar programas DMS; como el tiempo de uso de la electricidad (TOU); programas de mercado de capacidad; control directo de carga, reducción de la carga máxima del sistema, entre otros [1].

2.1.3. Almacenamiento de energía

Para contar con energía continua y estable en un sistema híbrido es fundamental los sistemas de almacenamiento de energía (SAE). Las baterías electroquímicas son un tipo común de sistemas de almacenamiento de energía con bajos costos iniciales. En la familia de baterías electroquímicas, las más usadas, son las de plomo - ácido y de iones de litio; que a menudo se conectan



a los sistemas solares fotovoltaicos no solo para almacenar energía verde sino también para reducir el gasto energético o el consumo de energía de la red [23]. También, existen otras fuentes de respaldo que almacenan energía como las celdas de hidrógeno, almacenamiento de microbomba de agua, resortes eléctricos y celdas de combustible. Los resortes eléctricos de CA han surgido de una nueva interfaz electrónica de potencia como una nueva tecnología de red inteligente, que puede actuar como un dispositivo de almacenamiento virtual. Es un dispositivo de potencia reactiva controlada por entrada, a diferencia de los dispositivos FACTS tradicionales. Se han utilizado resortes eléctricos de CA en sistemas de microrredes para reducir los requisitos de almacenamiento de energía. También se ha utilizado para diferentes aplicaciones como regulación de voltaje, frecuencia y corrección del factor de potencia. Los resortes también se utilizaron para reducir la dependencia de la red principal en microrredes que consisten en fuentes de energía intermitentes. También se realizan ciertos avances en las estrategias de control para operar los resortes eléctricos con el fin de proporcionar control de potencia activa y reactiva en las microrredes constituidas por fuentes de energía renovables [21]. La clasificación de acuerdo al tipo de almacenamiento de energía se puede apreciar en la tabla 2.1, entre estos los tres primeros grupos se utilizan principalmente para sistemas de energía eléctrica. Con los avances en las tecnologías de almacenamiento de energía, casi todas las tecnologías de almacenamiento se pueden aplicar tanto a pequeña escala como a gran escala. A nivel de pequeña escala, micro almacenamiento de bombeo de agua y micro almacenamiento de aire comprimido se han incluido en la clasificación de la tabla 2.1 en lugar de sus formas a gran escala [24].

Tabla 2.1 - Clasificación por tipo de almacenamiento de energía [24].

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Mecánica	Electroquímica	Electromagnética	Térmica
<ul style="list-style-type: none">Almacenamiento Hidráulico por bombeo de agua	<ul style="list-style-type: none">Baterías de plomo o ion - litio	<ul style="list-style-type: none">Supercondensadores	
<ul style="list-style-type: none">Almacenamiento de energía de aire comprimido	<ul style="list-style-type: none">Baterías metal – aire	<ul style="list-style-type: none">Almacenamiento de energía magnética superconductora	
<ul style="list-style-type: none">Volantes	<ul style="list-style-type: none">Celdas de combustible de hidrógenoCombustibles solares		



Las baterías que se ofrecen en el mercado son las Baterías de tipo AGM, baterías de GEL, las baterías de plomo – abierto y las baterías estacionarias. Cada una de estas varía por la tecnología utilizada. La elección de la batería va a depender de la capacidad, mantenimiento, del nivel de autonomía que se requiera y del precio que el usuario esté dispuesto a pagar. En la tabla 2.2 se toman diferentes marcas de baterías y tipos de tecnología utilizada, con la capacidad y el precio que se ofrece en el mercado. Estos datos son obtenidos de los catálogos de cada una de las marcas [25], [26], [27], [28], [29]; y los precios se obtuvieron de la empresa AUTOSOLAR.

Tabla 2.2 - Baterías disponibles en el mercado [25][26][27][28][29].

TIPO	Voltaje (v)	Energía (Ah)	Corriente máxima (Amáx) - 5seg.	Profundidad de descarga (DOD%)	Ciclos	Precio (\$)	Marca
Baterías AGM	12	100	900	30	1500	170	Tensite
	12	115	1200	30	1600	223.28	Ultracell
	12	150	1200	30	1500	241.55	Tensite
	12	250	2000	30	1500	391.12	Tensite
	12	300	2500	30	1500	437.4	Tensite
Batería de GEL	12	100	900	30	2200	172.35	Tensite
	12	150	1200	30	2200	241	Tensite
	12	172	1500	30	2200	333.2	Ultracell
	12	250	2000	30	2200	386.52	Tensite
	12	300	2000	30	2200	417.49	Tensite
Baterías de ion - litio	12	125	80	100	2500	1371.35	Upower Ecoline
	12	150	100	100	2500	1747.56	Upower Ecoline
	12	200	100	100	2500	1981.14	Upower Ecoline
	12	300	100	100	2500	2796.14	Upower Ecoline
Baterías Estacionarias	12	190	1400	50	3500	901.81	Ultracell - Opzs
	12	305	2450	50	3500	1159.5	Ultracell - Opzs
	12	550	3250	50	3500	1481.6	Ultracell - Opzs
	12	1120	6400	50	3500	2466.33	Ultracell - Opzs
	12	294	2400	50	3000	1302.64	TUDOR - GEL
	12	393	2910	50	3000	1334.7	BAE - GEL
	12	583	3140	50	3000	1638.27	BAE - GEL
	12	1600	7500	50	3000	4069.5	BAE - GEL
	12	345	Indef	50	1500	854.7	TAB - TOPzs
	12	575	Indef	50	1500	1010.52	TAB - TOPzs
	12	1300	Indef	50	1500	2552.27	TAB - TOPzs



2.1.4. Carga

En sistemas híbridos a pequeña escala normalmente las cargas se refieren a los electrodomésticos en un hogar. Son dispositivos que pueden ser controlados para mejorar la gestión de la energía del sistema híbrido [23]. Los artefactos eléctricos en un hogar se dividen en cargas programables y no programables. Las cargas programables son aquellos aparatos que pueden cumplir una función sin ningún control manual como el aire acondicionado y el calentador de agua. Mientras que los electrodomésticos no programables, como luces, computadoras y televisores, dependen del control manual para completar una tarea y solo se necesitan cuando los usuarios están en casa. Dado que el nivel de comodidad de los usuarios es bastante sensible a los servicios oportunos de los dispositivos no programables, su uso generalmente no se retrasaría. Los aparatos programables pueden clasificarse además en interrumpibles y no interrumpibles en términos de continuidad del tiempo de funcionamiento. Generalmente, los dispositivos interrumpibles suelen ser más programables que los no interrumpibles. Los aparatos no interrumpibles están limitados por un período de tiempo funcionamiento fijo llamado “tiempo de espera”. Además, como carga única en un hogar el vehículo eléctrico entraría a ser un electrodoméstico más. Dado que los vehículos eléctricos pueden cargarse o descargarse cuando están conectados a la red, en un hogar pueden suministrar energía eléctrica durante los momentos de máximo consumo de energía del sector residencial, mientras los usuarios consumen energía durante los periodos de menor actividad [9]. El control de los electrodomésticos da lugar a que se puedan aplicar diferentes estrategias DSM [30].

2.2. Clasificación de los sistemas híbridos de energía renovable

Generalmente, los sistemas híbridos de energía renovable (SHER) incluyen: a) una FER con SAE; b) dos o más FER con o sin SAE; o c) una o más FER y una o más fuentes de energía no renovable con o sin conexión a la red eléctrica. De acuerdo con la literatura existente sobre la combinación de diferentes tipos de SHER (Figura 2.4) muestra que el sistema hidroeléctrico / micro bombeo de agua, sistema solar y sistema eólica son los principales tipos de las FER en los SHER. [14].



2.2.1. Clasificación según conexión de red

Los SHER pueden clasificarse de acuerdo con su funcionamiento en autónomos o conectados a la red. La selección del tipo de conexión para el sistema híbrido está determinada principalmente por la aplicación requerida y el costo financiero.

2.2.1.1. *Sistemas Aislados*

En este caso el sistema híbrido no cuenta con conexión a la red, por lo que el sistema es responsable de suministrar energía para asegurar la demanda de carga en todo momento. Los problemas asociados con esta configuración están relacionados con la confiabilidad y el rendimiento. El uso de un sistema completamente aislado puede poner en peligro la seguridad de la energía proporcionada, debido al número limitado de recursos disponibles. De igual manera, el exceso de energía se desperdicia, lo que reduce el rendimiento del sistema. Por estas razones, esta configuración solo tiene viabilidad técnica y económica en aplicaciones donde es imposible o muy costoso el acceso a la red [19].

2.2.1.2. *Sistema conectado a la red*

Para esta configuración, el sistema está conectado a la red, lo cual, asegura que la demanda esté cubierta en situaciones de déficit energético y aumenta el rendimiento del sistema para aprovechar el exceso de energía para la venta y distribución en el mercado energético. El uso de este tipo de topología conduce a nuevos modelos de producción y estrategias de DMS basadas en el consumo y la generación distribuida a pequeña, mediana o gran escala [19].

2.2.2. Clasificación por método de integración

Este tipo de clasificación distingue el sistema según la naturaleza de la barra de interconexión interna. La función de esta barra es crear un vínculo físico entre todos los elementos, por lo que la generación y el consumo son a través de las condiciones impuestas a la barra. Dependiendo de la naturaleza de la barra, podemos distinguir entre los tipos AC (corriente alterna), DC (corriente directa) o híbridos.

2.2.2.1. Barra de DC

Estas barras se utilizan comúnmente en aplicaciones de baja potencia debido a una serie de ventajas técnicas que facilitan su uso. Entre estas ventajas, podemos destacar su reducción de pérdidas y simplicidad de uso, evitando problemas técnicos relacionados con la calidad de la energía [31]. Como desventaja, esta configuración requiere una mayor cantidad de elementos de conversión, porque la mayoría de las cargas deben ser alimentadas con CA. En la figura 2.5 se presenta un ejemplo de topología basada en una barra DC [19].

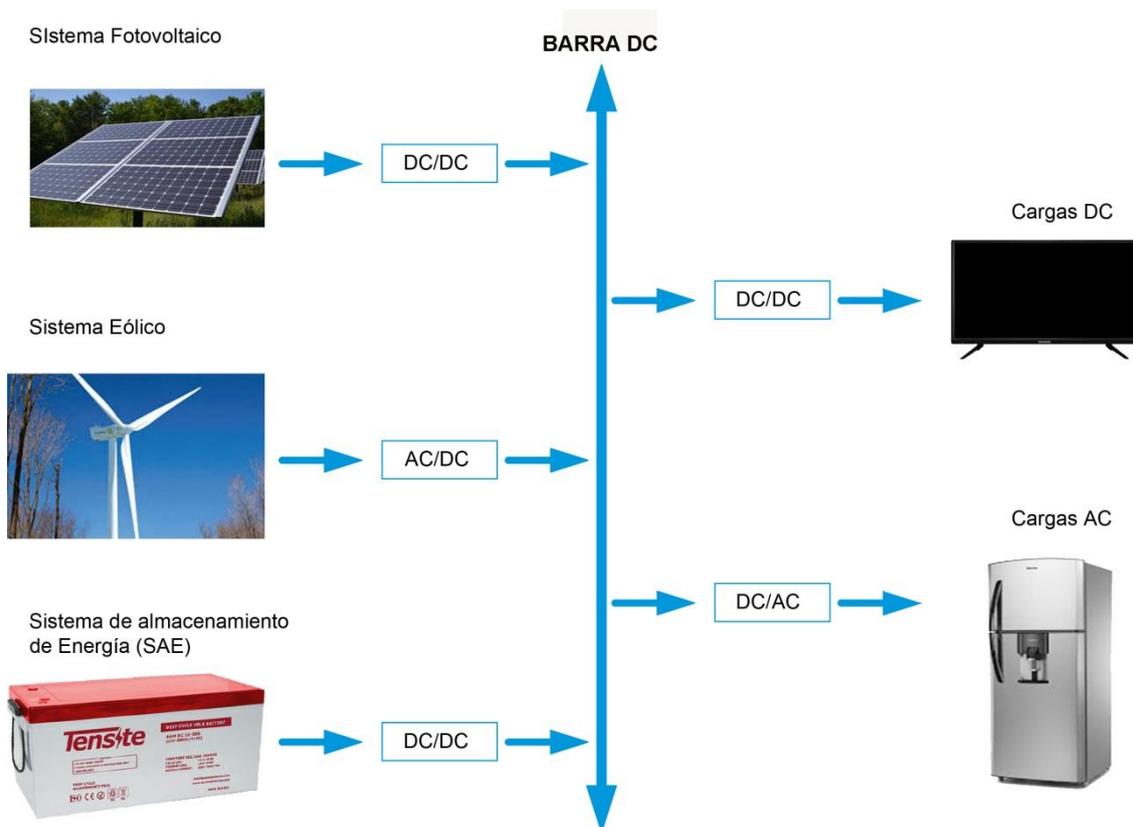


Figura 2.5 - Ejemplo de BARRA DC [19].

2.2.2.2. Barra de CA

Las barras de AC son ampliamente utilizados en aplicaciones de media y alta producción, debido a la sencillez técnica de operar a voltajes más altos que en DC, reduciendo las pérdidas internas del sistema. Las desventajas de esta configuración a menudo pueden poner en peligro la estabilidad o la integridad del sistema. La principal desventaja es la necesidad de elementos para la corrección de la calidad de la energía [31]. Cada vez es más común encontrar cargas inductivas y electrónicas que reducen el factor de potencia e incluyen armónicos respectivamente. Un factor de potencia reducido y un elevado número de armónicos pueden dañar los diferentes generadores, y requiere el uso de elementos de filtrado y compensación, aumentando la complejidad y costo del sistema [19]. Un ejemplo de configuración basada en barra de CA se presenta en la Figura 2.6.

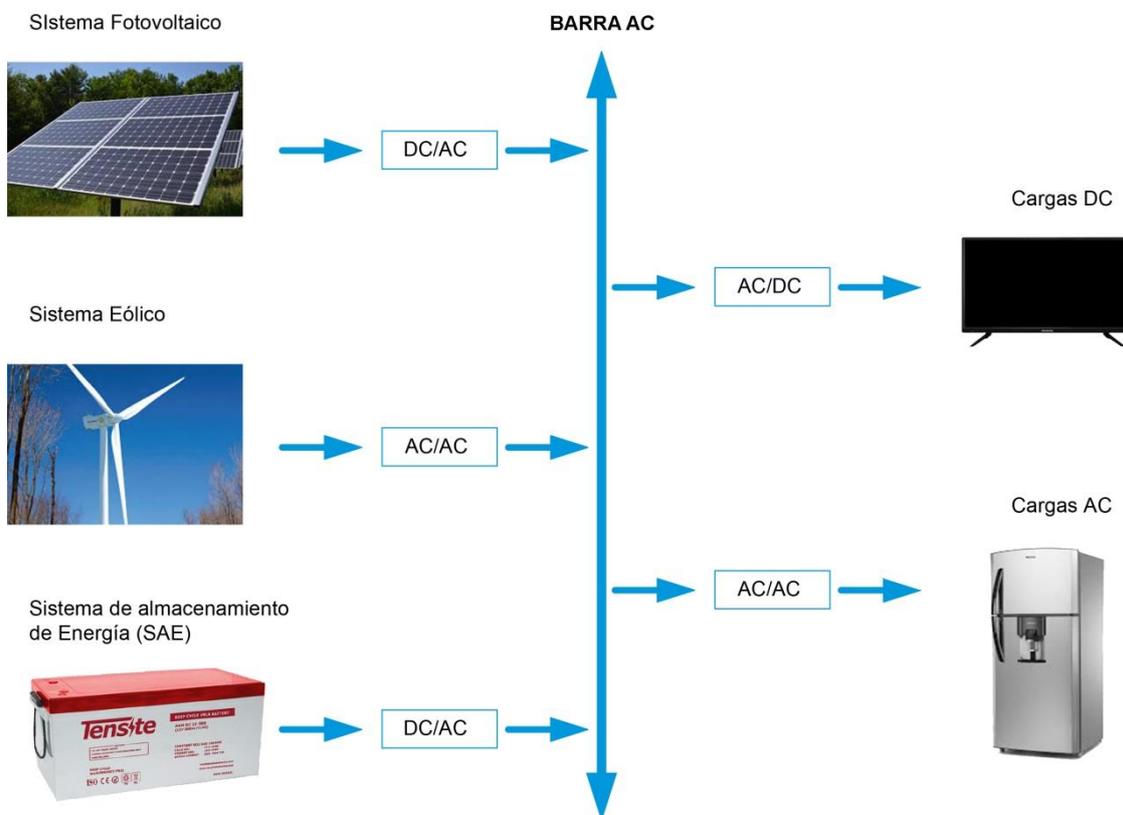


Figura 2.6 - Ejemplo de BARRA AC [19].

2.2.2.3. BARRA híbrida

Esta configuración hace uso de ambas barras (CC y CA) interconectando generadores y artefactos eléctricos que tienen la misma naturaleza. La principal ventaja de esta configuración es la reducción de convertidores de potencia. Como principal inconveniente del sistema, hay que destacar que el control es más complejo, operando en dos redes diferentes, asegurando el equilibrio de potencia en todo momento [19]. En la Figura 2.7 se presenta un ejemplo de topología basada en barra híbrida.

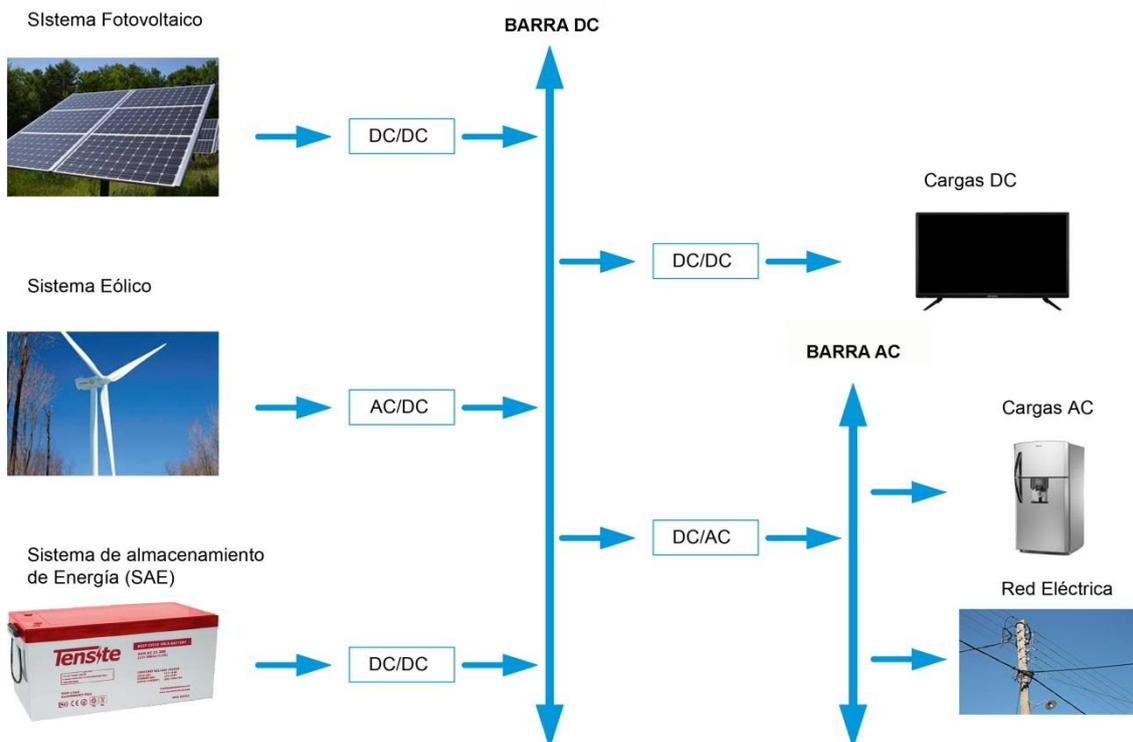


Figura 2.7 - Ejemplo de BARRA HÍBRIDA [19].

2.3. Gestión de la energía para un sistema híbrido de energía renovable

Administrar la energía de un sistema híbrido es una tarea muy importante, ya que se cuenta con varios recursos de energía que tienen que ser despachados de manera inteligente para que se aproveche de forma óptima la energía. Adicionalmente el uso de FER hace que el sistema sea intermitente y complejo, por lo que es necesario almacenar la energía o aprovechar otros recursos de



respaldo de energía, como la conexión a la red eléctrica o generador de diesel, para mantener la confiabilidad del sistema. También se deben tomar decisiones sobre el control de la carga, de tal manera que se pueda acoplar el consumo junto con el despacho de energía de las FER. Todas estas decisiones y otras más deben ser consideradas para administrar la energía de un SHER. No obstante, lo idóneo, además de administrar la energía, es aplicar en el SHER conceptos DSM que se analizaron en el capítulo anterior, ya que, el sistema eléctrico debe ser congruente con el manejo de un sistema híbrido a pequeña escala en el sector residencial. No se trata solamente de que el sistema híbrido funcione correctamente de forma óptima sino también de acoplarlo dentro de los conceptos DSM. Para ello se analiza las estrategias para la gestión de energía de un SHER, la perspectiva de la gestión de lado de la demanda de un SHER en el hogar y los métodos de la gestión óptima de la energía estudiados hasta el momento.

2.3.1. Estrategias de gestión de la energía

Para operar, integrar e interconectar varios dispositivos en un sistema de generación, asegurando un régimen de operación seguro y cumpliendo las metas, es necesario un sistema de control para administrar la energía. Una estrategia de gestión energética adecuada permite que el sistema satisfaga la demanda, aumente la vida útil de los elementos, reduzca los costos operativos y, por lo tanto, maximice el rendimiento del sistema, proporcionando una opción técnica y económicamente factible. [19]. La interacción dinámica entre las fuentes de energía renovable y la demanda de carga da como resultado serios problemas de estabilidad y problemas de calidad de la energía, como la regulación de frecuencia y voltaje para el usuario final. Por lo tanto, existe la necesidad de controlar y supervisar el sistema para superar la respuesta transitoria en la red de distribución de energía [31]. Esta necesidad no solo es esencial para un SHER autónomo, sino también para los SHER que están conectados a la red principal. Muchos de estos roles estratégicos en sistemas autónomos son asegurar la continuidad del suministro de carga en todas las condiciones, asegurar la máxima utilización de fuentes renovables, integrarse con el problema de optimización para minimizar el costo de producción de energía, proteger componentes que pueden dañarse debido a una sobrecarga, y para aumentar la estabilidad en el sistema de energía. Adicionalmente, la estrategia de gestión de la energía incluye el control del flujo de energía bidireccional a la red, con fines de medición. El control del flujo de energía para cambiar el pico en la curva de carga o para utilizar los períodos de tarifa de bajo costo también se encuentra entre estos objetivos. Para llevar a cabo

Marlon Abel Mosquera



cualquier estrategia de gestión energética adoptada, se debe seleccionar, instalar y programar un controlador central para controlar el sistema de acuerdo con una estrategia optimizada. El controlador central del despacho de energía del sistema híbrido puede integrarse con un entorno de monitoreo y supervisión como SCADA programado mediante una estrategia que busque optimizar el despacho de energía. [32]. A continuación, de acuerdo al artículo titulado: “A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup” de la revista *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [19], se presenta una clasificación de las diferentes estrategias de la gestión óptima de un sistema híbrido utilizadas en la literatura científica.

2.3.1.1. Estrategias en las que el objetivo es asegurar la demanda

El principal objetivo de este tipo de estrategias es satisfacer la demanda, y para ello basa su algoritmo de control principalmente en tres criterios de diseño: balance de potencia, estado de carga de las baterías y stock de hidrógeno, en función de los elementos que integran el sistema. Estas variables de diseño establecen los límites operativos de los principales sistemas de almacenamiento de energía, como las baterías para el almacenamiento a corto plazo y las celdas de combustible FC de sus siglas en inglés fuel cells y los electrolizadores (ELEC) para el almacenamiento a largo plazo.

La principal ventaja de estas estrategias es la sencillez en el diseño y control, regida principalmente por algoritmos basados en diagramas de flujo sencillos. De la misma forma, también se simplifican las aplicaciones de dimensionamiento que incluyen esta estrategia. Por otro lado, al no utilizar parámetros de optimización basados en degradación de equipos, modos de operación o costos operativos del sistema, provoca una solución no óptima desde el punto de vista técnico y económico.

Un esquema resumido de las principales características de esta estrategia y una revisión de los objetivos de optimización, las restricciones de diseño y el algoritmo de control se presentan en la figura 2.8.

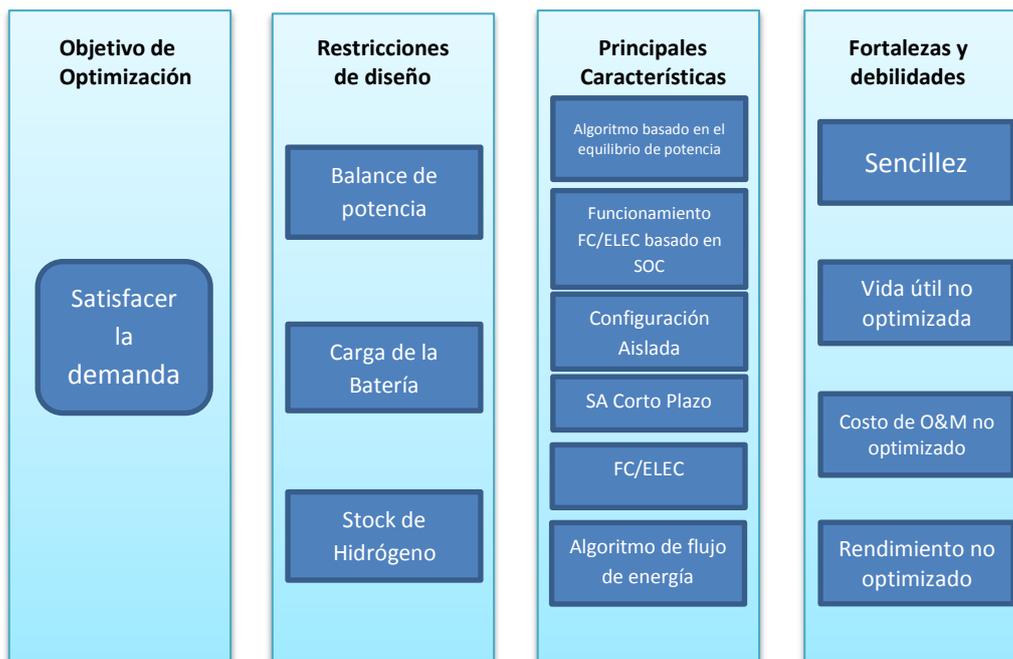


Figura 2.8 - Principales características de las estrategias cuyo objetivo es asegurar la demanda [19].

2.3.1.2. Estrategias cuyos objetivos incluyen factor de decisión técnica

Estas estrategias, además de asegurar la demanda en todo momento, tienen en cuenta criterios técnicos para garantizar el correcto uso de los equipos. El principal objetivo de estas estrategias es reducir la degradación de los equipos más susceptibles durante el funcionamiento del sistema. Estos elementos son batería, electrolizador y celdas de combustible. Las soluciones adoptadas en la literatura son diversas y dependen del objetivo principal del estudio. Para realizar el algoritmo de control, el balance de energía, el estado de carga del sistema de almacenamiento y los parámetros de degradación se definen como restricciones de diseño.

Las principales ventajas de estas estrategias son su diseño y control de complejidad media, y los buenos resultados en términos de rendimiento y / o vida útil del sistema, según el objetivo de optimización. Por otro lado, no se tienen en cuenta los parámetros económicos, por lo que no se optimiza la respuesta del sistema.

Un esquema resumido de las principales características de esta estrategia y una revisión de los objetivos de optimización, restricciones de diseño y algoritmo de control se presenta figura 2.9.

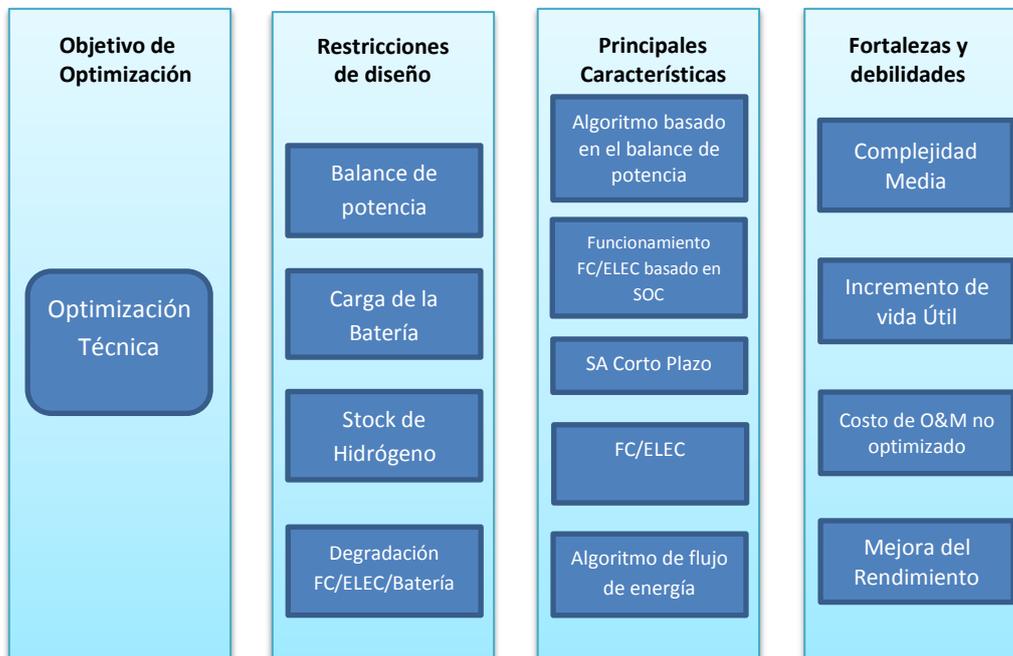


Figura 2.9 - Principales características de las estrategias cuyos objetivos incluyen factor de decisión técnica [19].

2.3.1.3. Estrategias cuyos objetivos incluyen factor de decisión económica

Estas estrategias incluyen un análisis económico además de una garantía del balance de potencia. Estos parámetros económicos ayudan a determinar una solución óptima desde un punto de vista económico. En muchos casos, esta solución óptima no determina un funcionamiento favorable de los equipos por no contar con criterios técnicos suficientes para evitar problemas asociados a diferentes regímenes operativos. Estas estrategias tienen aplicaciones potenciales en el dimensionamiento y el análisis a largo plazo.

La principal ventaja de estas estrategias es la respuesta óptima del sistema desde un punto de vista económico. Por otro lado, se utilizan algoritmos de optimización complejos, por lo que aumenta la complejidad en aplicaciones

Marlon Abel Mosquera

reales. De la misma forma, la confiabilidad del modelo para definir la función de costo es crucial para obtener el mejor desempeño. Por último, los parámetros técnicos no se tienen en cuenta, por lo que es posible que no se optimice la vida útil del sistema.

Un esquema resumido de las principales características de esta estrategia y una revisión de los objetivos de optimización, restricciones de diseño y algoritmo de control se presenta en la figura 2.10.

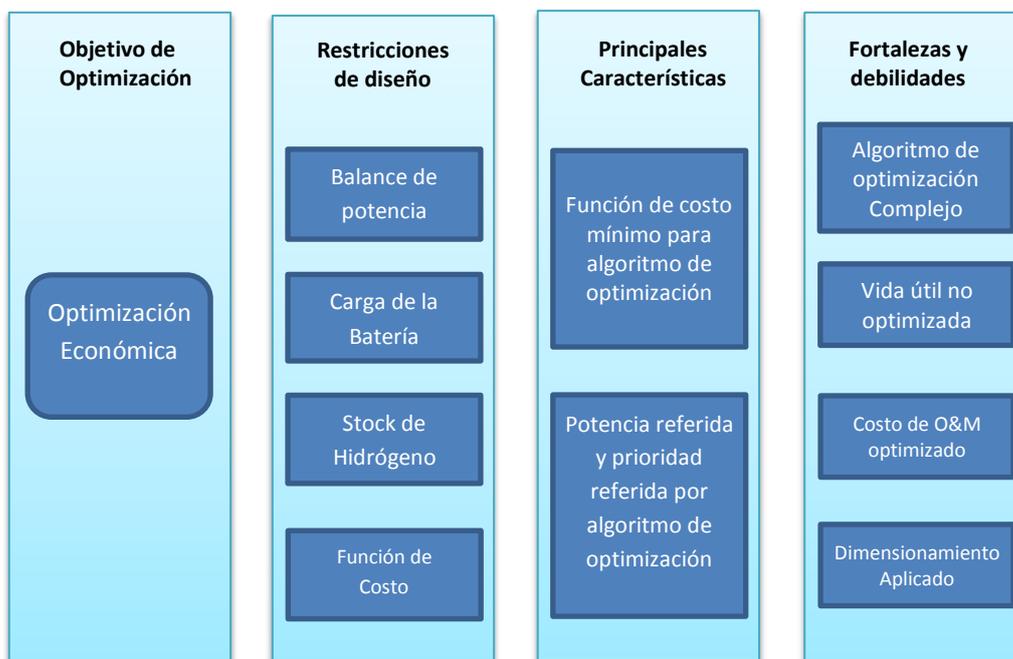


Figura 2.10 - Principales características de las estrategias cuyos objetivos incluyen factor de decisión económica [19].

2.3.1.4. Estrategias cuyos objetivos incluyen factores de decisión técnicos y económicos

Finalmente, este tipo de estrategia busca incrementar el desempeño del sistema, basado en el adecuado despacho para la demanda. Se tienen en cuenta criterios técnicos y económicos para aumentar la vida útil de los equipos y reducir los costos de mantenimiento. Esta estrategia tiene una solución óptima desde el punto de vista técnico y económico, frente a los sistemas alternativos de generación tradicionales. Las soluciones adoptadas en la literatura se basan en problemas de optimización no lineal, utilizando la depreciación de costos y equipos integrados en una función multiobjetivo. La solución de este problema mediante diversas técnicas determina la potencia de referencia suministrada por cada elemento en cada iteración, asegurando el

equilibrio de potencia con un rendimiento óptimo del sistema. Finalmente, como en los casos anteriores, la solución implementada en casos extremos de alto exceso o déficit energético dependerá de la topología del sistema.

La principal ventaja de estas estrategias es la respuesta óptima del sistema desde un punto de vista técnico y económico. Se tienen en cuenta los parámetros de vida útil y rendimiento para definir la función de costo. Por otro lado, se utilizan algoritmos de optimización complejos, por lo que aumenta la complejidad para desarrollar aplicaciones reales.

Un esquema resumido de las principales características de esta estrategia y una revisión de los objetivos de optimización, restricciones de diseño y algoritmos de control se presenta en la figura 2.11.

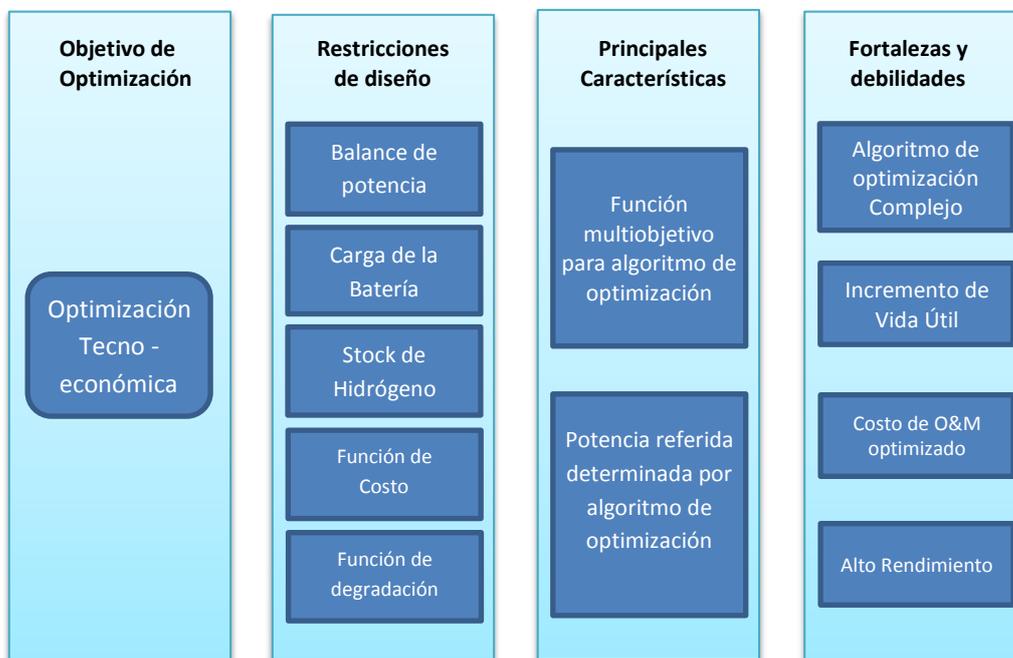


Figura 2.11 - Principales características de las estrategias cuyos objetivos incluyen factor de decisión técnica y económica [19].

2.3.2. Gestión de lado de la demanda para sistemas híbridos de energía renovable en el hogar

Las estrategias del lado de la demanda DSM para un SHER en el hogar son las que se menciona en la sección 1.4, de los que se destacan las modalidades



DELM Y SELM. La modalidad SELM aplica como conservación estratégica para sistemas híbridos que integren programación de electrodomésticos de tal manera que minimicen el consumo de energía de la red eléctrica mediante las FER instaladas en el hogar. La modalidad DELM en cambio aplica estrategias de respuesta a la demanda DR (Tabla 1.3), ya sea basadas en precios o en incentivos. Ambas estrategias pueden ser aplicadas gracias a los SHER debido a la generación autónoma de FER y SAE. El artículo titulado: “Techno-economic and environmental optimization of a household photovoltaic-battery hybrid power system within demand side management” de la revista Renewable Energy [23], hace un estudio de la gestión de lado de la demanda de un SHER para el hogar que utiliza sistema fotovoltaico y sistema de baterías con un algoritmo de control que toma en cuenta criterios técnicos y económicos, además del nivel de inconveniencia del usuario, el cual, incorpora estrategias de respuesta a la demanda TOU, para sacar ventaja de la variación del precio al cambiar la carga de periodos pico a horas valle. Para poder aplicar los conceptos DSM evidentemente el SHER debe estar conectado a la red. La ventaja es que la mayoría de los hogares aislados en los últimos años están obteniendo conexión a la red eléctrica [2].

2.3.3. Técnicas de optimización de la gestión de lado de la demanda en el hogar

El uso optimizado de recursos y activos de energía eléctrica permite a los usuarios administrar de manera eficiente el consumo de energía en el hogar. La optimización se define como el proceso de encontrar las condiciones que den el máximo beneficio o el mínimo costo de un proceso [33]. El objetivo de optimización en los estudios publicados se centra en reducir la relación pico a promedio, en la demanda de carga y el costo de electricidad del consumidor sin perturbar el confort. Algunos investigadores se enfocan en un solo objetivo mientras que otros brindan soluciones para la resolución de múltiples objetivos, que hacen la optimización multiobjetivo. En esta sección se clasifican las diversas técnicas de optimización de un estudio hecho en la referencia [34]. Con base en la naturaleza de las expresiones para la función objetivo y las restricciones, la clasificación de las técnicas de optimización se representa en la figura 2.12.

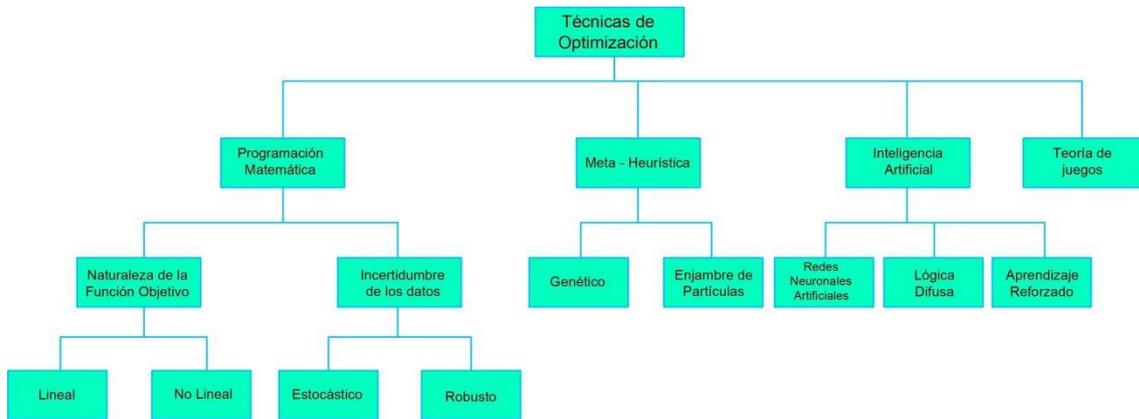


Figura 2.12 - Clasificación de técnicas de optimización HEMS [34].

2.3.3.1. Programación Lineal

La programación lineal es una técnica de optimización en la que la función objetivo está representada por relaciones lineales de variables de decisión, sujetas a restricciones de desigualdad lineal [33]. Se dice que la programación lineal, es lineal de enteros si todas las variables de decisión son enteros, mientras que lineal de enteros mixtos (PLEM) si algunas, pero no todas las variables de decisión consideradas en la formulación del problema son enteros. El problema de programación lineal se puede expresar en forma de matriz como:

Minimizar

$$c^T x \quad (2.1)$$

Sujeto a

$$Ax = b \quad (2.2)$$

Donde c^T , A y B son matrices constantes. x es la variable desconocida

Muchos investigadores han aplicado la optimización de programación lineal para problemas de optimización de la gestión energética. Se usa para problemas de respuesta a la demanda, siendo la técnica más sencilla y fácilmente integrada en el sistema de gestión energética.



El modelo basado en PLEM se puede resolver de forma extremadamente rápida y eficaz utilizando solucionadores disponibles comercialmente como CPLEX, Gurobi, Xpress y MATLAB. Dichos solucionadores pueden encontrar una solución óptima y resolver problemas de optimización grandes y complejos. A pesar de estas ventajas, las formulaciones PLEM tienen algunos inconvenientes. Las restricciones no lineales no se pueden utilizar directamente en este modelo. Además, sufre el riesgo de un alto dimensionamiento del problema.

2.3.3.2. Programación no Lineal

Si alguna de las funciones entre los objetivos y las restricciones del problema de optimización es no lineal, el problema se denomina problema de programación no lineal (PNL). Esta es la forma más general y utilizada por muchos investigadores en el pasado. El problema de optimización de la PNL se puede representar como:

Minimizar

$$f(x) \tag{2.3}$$

Sujeto a

$$g_i(x) \leq 0, \text{ por cada } i \in \{1, \dots, m\} \tag{2.4}$$

$$h_j(x) = 0, \text{ por cada } j \in \{1, \dots, p\} \tag{2.5}$$

$$x \in X$$

Dónde n , m y p son números enteros positivos. X es un subconjunto de R^n . $f(x)$, $g_i(x)$, $h_j(x)$ son funciones de valor real en X , siendo al menos uno de ellos no lineal.

Este método se utiliza para programación óptima de la carga eléctrica considerando electrodomésticos con diferentes consumos de energía y
Marlon Abel Mosquera



características de operación, el cual, se ha formulado como programación no lineal de enteros mixtos (PNLEM). Además, se ha utilizado para incorporar las estrategias DSM de la respuesta a la demanda TOU para el esquema de precios. Y también para resolver funciones de optimización multiobjetivo que considera minimización de costos y energía tomando en cuenta la comodidad del usuario [23].

El modelo PNLEM puede tratar problemas tanto convexos como no convexos. Puede resolver problemas de optimización con evaluaciones de funciones complejas. Además, los valores de las variables no necesitan ser aproximados, pueden ser relajados al usar este modelo. Sin embargo, la convergencia PNLEM es lenta, la solución factible no se puede determinar hasta que alcance el valor de convergencias. Dado que los problemas de la PNLEM combinan las dificultades de sus dos subclases: la naturaleza combinatoria de los programas enteros mixtos y la dificultad para resolver programas no lineales no convexos (e incluso convexos), su resolución es un desafío.

2.3.3.3. Optimización estocástica

La optimización estocástica es una técnica de optimización matemática que busca maximizar o minimizar una función objetivo que se ocupa de variables o restricciones aleatorias. Para resolver este tipo de problemas, se requieren supuestos estructurales, tales como límites en el tamaño de los espacios de decisión y resultados. Los estudios sobre la gestión del lado de la demanda que incluyen fuentes de energía renovables y el comportamiento aleatorio de los consumidores se modelan como problemas estocásticos [35].

La optimización estocástica está destinada a resolver problemas de toma de decisiones multiobjetivo en presencia de incertidumbres y riesgos. Sin embargo, a menudo no pueden manejar problemas de optimización altamente restringidos y no ofrecen límites a la solución.



2.3.3.4. Optimización Robusta

La optimización estocástica y robusta se ocupa de la incertidumbre de los datos. La diferencia entre ellos radica en el hecho de que la optimización estocástica asume que la distribución de probabilidad de los datos inciertos es conocida / estimada. La optimización robusta, por otro lado, optimiza el peor de los casos que puede ocurrir y asume varias suposiciones y, por lo tanto, es más adecuada para problemas de optimización de la vida real [36].

El modelado con optimización robusta no requiere conocimientos previos sobre entradas inciertas. Puede encontrar solución incluso en presencia de incertidumbre de parámetros y perturbaciones externas en el problema de optimización. Se utiliza principalmente cuando la solución óptima de la función objetivo es muy sensible a las perturbaciones. Sin embargo, es computacionalmente costoso y difícil de implementar para problemas complejos que involucran un gran número de variables inciertas.

2.3.3.5. Algoritmos Metaheurísticos

Los algoritmos metaheurísticos son algoritmos de computación blanda heurísticos y basados en poblaciones que pueden encontrar una solución global de problemas computacionales complejos de una manera computacionalmente eficiente al tomar comparativamente menos tiempo de ejecución en comparación con las soluciones de optimización matemática. Muchos ejemplos ilustrados en la literatura se centran en algoritmos metaheurísticos para resolver el problema de optimización de DR [34] [37].

Las principales ventajas de las técnicas metaheurísticas son la facilidad de implementación, el manejo de objetivos y restricciones no lineales o discontinuas, y la resolución de problemas de alta complejidad computacional. Pero los problemas con el uso de algoritmos metaheurísticos son que pueden converger prematuramente y quedarse atascados en un mínimo local, particularmente para problemas complejos. Estos algoritmos consumen mucho tiempo para problemas con un gran número de variables.



2.3.3.6. *Inteligencia Artificial*

El campo de la inteligencia artificial se basa en algoritmos de redes neuronales, lógica difusa y aprendizaje reforzado, los cuales, simulan funciones relacionadas con la inteligencia humana. Muchos investigadores en el pasado utilizaron inteligencia artificial para la toma de decisiones inteligente, la predicción, el pronóstico y la programación [34].

La inteligencia artificial (IA) tiene la capacidad de trabajar con datos escasos, procesamiento paralelo, tomar mejores decisiones a través del aprendizaje, reconocimiento de patrones y resolución de funciones no lineales con complejidad arbitraria. También tiene algunas desventajas. Se requiere hardware con potencia de procesamiento paralelo para ejecutar modelos de IA. Puede funcionar solo con valores numéricos. La validación y verificación del modelo de IA requieren pruebas exhaustivas con hardware.

2.3.3.7. *Teoría de juegos*

La teoría de juegos para resolver problemas de optimización en un entorno distribuido está ganando atención recientemente entre los investigadores. Esta técnica se utiliza principalmente en situaciones donde los consumidores egoístas y racionales necesitan tomar decisiones en condiciones ambientales inciertas. El comercio de energía local (compra y venta de energía) en un entorno de red inteligente se implementa principalmente mediante el enfoque de juego [34].

La teoría de juegos es una técnica cuantitativa para resolver problemas donde existe interdependencia entre los tomadores de decisiones y otros para llegar a una estrategia óptima. Por lo tanto, se puede utilizar para decidir la mejor estrategia en situaciones competitivas, lo cual, ayuda en la toma de decisiones racionales. Sin embargo, la teoría de juegos se vuelve difícil de resolver cuando aumenta el número de jugadores involucrados. Además, no habla de la estrategia ganadora, sino que usa solo reglas generales de lógica. La incertidumbre en el campo real es difícil de modelar utilizando esta técnica.



Capítulo 3

3. Modelamiento del sistema híbrido de baterías / sistema fotovoltaico conectado a la red

En la figura 3.1 se muestra un sistema eléctrico híbrido de baterías / sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica (SHB/SF). Este sistema de energía híbrido consta de un sistema fotovoltaico (SF) y un banco de baterías conectadas con la red eléctrica, así como algunos aparatos eléctricos. El SAE presenta más desafíos en la gestión de energía para escenarios más complicados que deben considerarse, por ejemplo al cargar el banco de batería (BT) ya sea desde la red eléctrica o la energía fotovoltaica, y cómo distribuir el suministro de energía para los electrodomésticos, ya sea, desde el SAE, el SF o la red. Como resultado, se requiere una unidad de gestión de energía (UGE) para el SHB/SF, de modo que el rendimiento del uso de energía solar se pueda mejorar significativamente y la regulación de la energía híbrida se pueda mejorar en términos de eficiencia energética. La UGE se utiliza para implementar la conversión de energía (es decir, CA / CC, CC / CC, CC / CA) para la adaptación de voltaje y corriente, así como para distribuir la energía. Por ejemplo, el banco de baterías se puede cargar del sistema fotovoltaico en forma DC / DC o de la red en forma AC / DC a través de la UGE; también puede descargar electricidad a las cargas eléctricas de manera CC / CA a través de la UGE. Y los electrodomésticos son alimentados por electricidad de la red o SAE o SF a través de la UGE. En la Figura 3.1, está claro que la UGE actúa como el equipo central que está conectado con todos los demás equipos en el sistema de energía, de modo que puede llevar a cabo la gestión del sistema de energía tanto en el nivel de distribución de energía como en el nivel de programación del aparato. Además, este diseño, todo en uno, simplificaría la estructura del sistema de energía residencial y facilitaría la instalación y aplicación del sistema de administración de energía. Con el desarrollo de la red inteligente y la tecnología del hogar inteligente, cada vez más dispositivos están equipados con interfaces de comunicación abiertas para control externo, lo que hace que UGE pueda programar los dispositivos a través de enlaces por cable o inalámbricos. Para otros aparatos convencionales sin la interfaz de control externo, se necesitan algunos interruptores eléctricos para conectar / desconectar los aparatos a la fuente de alimentación eléctrica. Dado que la mayoría de los hogares con sistemas de generación fotovoltaica de pequeña capacidad no pueden garantizar que la energía que alimentan a la red sea siempre limpia y sin amenazar el funcionamiento de la red, la venta de electricidad del SHB/SF doméstico conectado a la red no ha sido ampliamente aceptada por empresas de servicios públicos hasta ahora. Por esta razón, no se considera en este trabajo.

Marlon Abel Mosquera

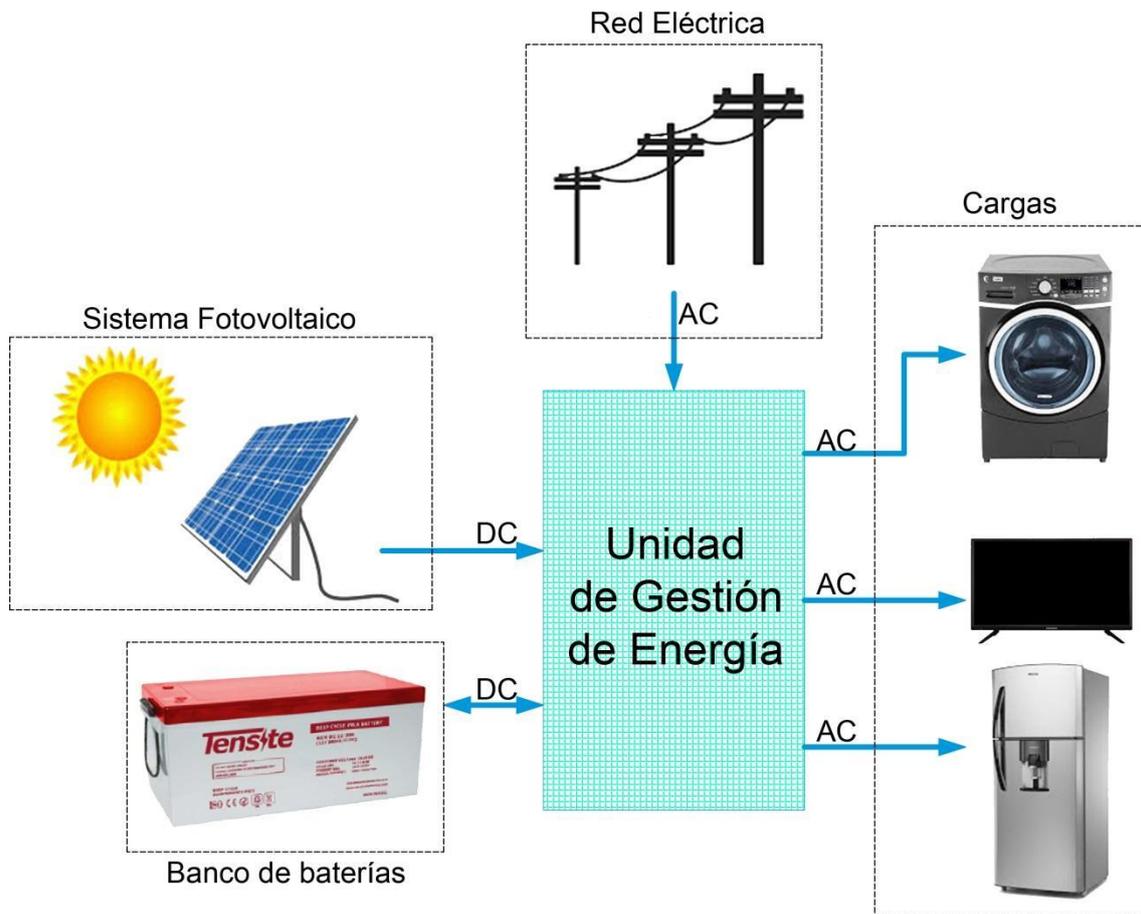


Figura 3.1 - Disposición general del sistema eléctrico doméstico PV-BT [23].

3.1. Esquema del sistema de gestión de energía híbrido de baterías / sistema fotovoltaico conectado a la red

En la figura 3.2 se establece el diseño del sistema de gestión de energía híbrida de baterías / sistema fotovoltaico conectado a la red. Ahí se muestra la topología interna de la UGE, la cual consta de cinco interruptores (g_1, g_2, g_3, g_4, g_5) para implementar el control de conmutación estratégica del sistema. La UGE está compuesta de un controlador de carga solar, un cargador de AC, un inversor y cinco interruptores. Todos estos componentes pueden ser fácilmente accesibles a bajo costo. El controlador de carga solar, además de ser un controlador solar para la batería, también cumple la función de acondicionar de energía DC / DC para cargas de DC. El inversor se encarga de convertir DC / AC de la energía proveniente del SF o del SAE a las cargas, que en este caso son los electrodomésticos utilizados en el hogar. El cargador AC se utiliza para convertir AC / DC para cargar las baterías desde la red eléctrica. Los coeficientes de eficiencia de conversión de energía del

Marlon Abel Mosquera

controlador de carga, el inversor y el cargador AC son n_s , n_i y n_c respectivamente. Las líneas de la figura 3.2 indica la dirección de los flujos de energía, la cual, está controlada con un interruptor. Los interruptores $g_1(t)$, $g_2(t)$, $g_3(t)$, $g_4(t)$, $g_5(t)$ pueden estar en dos estados ON/OFF en el tiempo t respectivamente, es decir, $g_i(t) = 1$ significa que el interruptor g_i está ENCENDIDO en el momento t , $g_i(t) = 0$ significa que el interruptor g_i está APAGADO en el momento t . Sin embargo, para simplificar el cálculo, las cuatro variables binarias g_1 , g_2 , g_4 y g_5 no aparecerán en el proceso de modelado y cálculo porque sus estados pueden estar implícitos en el valor de las variables $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_4(t)$ y $P_5(t)$, respectivamente. Además, los productos de cargadores, inversores y controladores de carga comerciales suelen tener interruptores incorporados, que también pueden realizar el control del flujo de energía. Por ejemplo, $P_1(t) = 0$ implica que g_1 está APAGADO en el momento t , y si $P_1(t) \neq 0$ implica que g_1 está ENCENDIDO en el momento t . Para simplificar, se asume que P_3 es una constante que representa la potencia promedio de la red eléctrica que pasa por el cargador AC para cargar la batería, y $g_3(t)$ se utiliza para indicar el estado ON / OFF del cargador de AC en el momento t [23].

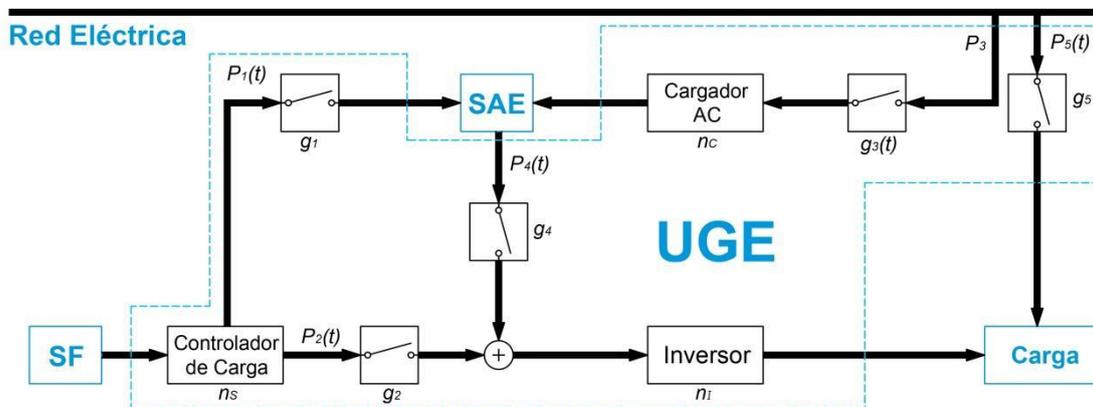


Figura 3.2 - Esquema del sistema de gestión de energía híbrido de baterías / sistema fotovoltaico conectado a la red [23].

El SHB / SF conectado a la red permite una variedad de estrategias operativas, así como beneficios potenciales en comparación con un sistema de energía que solo consume energía de la red. Este trabajo analiza el funcionamiento del sistema eléctrico desde el punto de vista de la eficiencia energética. Para ello es indispensable modelar el sistema híbrido de cada una de las partes del sistema, a saber, el SF, SAE, Red eléctrica, las cargas eléctricas y las restricciones del sistema.



3.2. Sistema fotovoltaico

El modelo matemático del sistema fotovoltaico puede hacerse de varias maneras. De acuerdo con la referencia [38] existen modelos eléctricos equivalentes a un circuito simple para una celda fotovoltaica, que consiste en un diodo en paralelo con una fuente de corriente ideal, en donde relacionan la tensión de salida fotovoltaica y la corriente en función de ciertos parámetros. También existen modelos mejorados con dos diodos para tener una mejor precisión, de acuerdo con las características constructivas de los paneles solares. Otro modelo matemático del SF es el modelo térmico, el cual depende de la temperatura de funcionamiento. Sin embargo, para la gestión de la energía del sistema híbrido estos modelos no son de utilidad porque se asume un modelo de acuerdo con el esquema de la figura 3.2, en el que es conocida la generación de energía del SF para despacharla de acuerdo con la demanda de los electrodomésticos. Por esa razón, en este estudio se supone que se puede pronosticar el perfil de producción de energía diaria del sistema fotovoltaico.

Una manera simple para estimar la producción de energía por hora del SF con un tamaño de panel conocido se puede formular con la siguiente ecuación:

$$P_{SF} = n_{SF} I_{SF} A \quad (3.1)$$

Donde P_{SF} es la producción de energía por hora de un SF de un área determinada de paneles solares; I_{SF} es la radiación solar incidente por hora en los paneles solares (kW/m^2); A es el tamaño total de los paneles solares dados.

3.3. Banco de Baterías

Un banco de baterías (BT), puede cargarse desde otras fuentes de energía y descargar electricidad a las cargas según el proceso de reacción electroquímica. Por lo general, se requiere que todas las baterías funcionen en los mismos estados cuando se usan simultáneamente en un sistema de energía. El estado de carga (SOC de sus siglas en inglés states of charge) el BT cambia dinámicamente debido a una posible carga del SF y la red o una posible descarga de las cargas eléctricas. Por lo tanto, las condiciones operativas afectarán principalmente al SOC de las baterías.



3.3.1. Modelamiento del estado de carga de la batería

El SOC dinámico del BT se puede modelar en función del tiempo para N periodos de muestreo, de la siguiente manera:

$$C(t) = C(0) + \sum_{\tau=1}^t \eta_B P_1(\tau) \Delta t + \sum_{\tau=1}^t \eta_B \eta_C g_3(\tau) P_3 \Delta t - \sum_{\tau}^t P_4 \Delta t \quad (3.2)$$

$$t = 1, 2, \dots, N$$

En donde t es el índice los N intervalos de tiempo de un día, y $C(t)$ denota la capacidad disponible de la batería en el t – ésimo intervalo de tiempo. En este caso, $C(0)$ es la capacidad inicial de la batería en un día; Δt es el lapso de tiempo de un intervalo de tiempo o muestreo, $\Delta t = \frac{24}{N}$ hora; $P_1(\tau) \Delta t$ es la energía fotovoltaica cargada en la batería durante el t - ésimo intervalo de tiempo; $g_3(\tau) P_3 \Delta t$ es la energía de red suministrada para cargar la batería durante el t - ésimo intervalo de tiempo; $P_4 \Delta t$ es la energía descargada de la batería en el t - ésimo intervalo de tiempo. $\eta_C \leq 1$ es el coeficiente de la eficiencia de carga AC / DC. η_B es el coeficiente de eficiencia del SB, que es la relación entre la energía que se puede extraer del BT durante la descarga en comparación con la energía que ingresa el BT durante la carga. Al cargar el BT, puede tratarse como un aparato eléctrico más, mientras que durante la descarga actúa como una fuente de energía. Existen varias limitaciones en el SOC del BT, incluida la capacidad mínima permitida y la profundidad de descarga (DOD de sus siglas en ingles depth of discharge).

$$C^{min} = (1 - DOD) C^{max} \quad (3.3)$$

Donde DOD es la profundidad de descarga expresada como porcentaje; C^{min} y C^{max} es la capacidad mínima y máxima del BT, respectivamente. El SOC debe estar acotado dentro de la escala $[C^{min}, C^{max}]$:

$$C^{min} \leq C(t) \leq C^{max} \quad (3.4)$$



3.3.2. Modelamiento de la vida útil del banco de baterías

Es muy importante tomar en cuenta el modelamiento de la vida útil del BT ya que es considerado uno de los componentes con más corta vida útil de la mayoría de los SHB / SF. Por esa razón es considerado una parte importante en los costos de inversión. Aun así no se ha considerado plenamente en muchos estudios existentes que traten sobre sistemas híbridos residenciales [39]. Generalmente, en escenarios reales, BT experimenta una amplia gama de condiciones operativas, que determinan la vida útil de BT. Esto plantea una incertidumbre financiera, debido al costo de reemplazo de BT durante la vida útil del sistema híbrido. Existen varios métodos para calcular el consumo durante la vida útil, por ejemplo, el método de recuento de rendimiento Ah y el de recuento cíclico. En este trabajo, se emplea el método de recuento del rendimiento Ah para evaluar el consumo del BT durante toda su vida. Este método asume que se puede almacenar una cantidad fija de energía a través de un BT antes de que sea necesario reemplazarlo. El rendimiento total estimado TH , durante la vida útil de un BT se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$TH = F_i \cdot DOD_i \cdot C^{max} \quad (3.5)$$

Donde DOD_i es la profundidad de descarga que se está considerando, F_i representa el número correspondiente de ciclos hasta la falla, e i representa cada curva DOD vs. ciclos hasta la falla según el catálogo del fabricante. En el sistema de energía híbrido presentado en este trabajo, el BT debe cargarse y descargarse durante cada día para aprovechar al máximo la energía solar para ahorrar energía convencional o ahorrar dinero. El rendimiento total del BT (C_D), durante un día determinado se puede contar como:

$$C_D = \sum_{t=1}^N P_4 \cdot \Delta t [kWh] \quad (3.6)$$

Para evaluar C_D , el costo del BT, el transporte, la instalación y la operación durante su vida útil deben tenerse en cuenta en el análisis de costos del ciclo de vida. La suma de estos costos B_c se divide por el rendimiento total TH y luego el costo de desgaste del BT durante un día dado se puede derivar por:



$$J_B = C_D \cdot \frac{B_c}{TH} \quad (3.7)$$

De hecho, el costo de desgaste del BT generalmente resulta de dos tipos de degradación, una es la degradación del ciclo y la otra es la degradación del calendario [40]. J_B representa el primero que es causado por las operaciones de carga y descarga. Este último se debe principalmente al fenómeno de envejecimiento, que tiene una débil relación con las operaciones siempre que se garantice una correcta aplicación y temperatura. Por lo tanto, el costo relacionado con la degradación del calendario de BT puede considerarse fijo. En este trabajo se toma en cuenta que el costo de desgaste de la energía fotovoltaica y otros componentes en el sistema eléctrico residencial es causado principalmente por la degradación del calendario y tampoco se considera en el modelo de optimización.

3.4. Red eléctrica

La red se modela como una barra colectora infinita a niveles de voltaje AC de 127 V. Es capaz de suministrar energía a un hogar, para cargar el BT o directamente a los electrodomésticos. Esto constituye la factura mensual de electricidad que debe pagar el usuario por el servicio prestado de las empresas distribuidoras. Además, las medidas DSM para el sector residencial, tratan de las estrategias DR sobre el precio variante de la energía TOU, que dan pie a aplicar estrategias de control óptimas para minimizar el costo de la electricidad según el programa de precios TOU. En varios países estas medidas son aplicables, sin embargo, en Ecuador no lo son ya que no tiene programas de tarifas TOU, el cual, consiste en pagar un precio bajo de la electricidad en períodos de menor actividad, pagar un precio medio durante periodos estándar y se paga un precio alto durante los períodos de máxima actividad. La función que se formaría matemáticamente del precio sería una por partes, el precio de electricidad $p(h)$ depende del horario h donde se use la electricidad [41]. Como en Ecuador el precio de la electricidad es fijo [10], la ecuación que se forma sería:

$$p(h) = 0.099 \frac{\$}{kWh}, \text{ si } h \in [00:00, 24:00] \quad (3.8)$$

Aunque el precio sea fijo la ventaja es que con la ayuda de la generación del SF se pueden tomar medidas DSM para reemplaza el uso de la red eléctrica por la energía renovable gratuita. De esa manera, se puede minimizar el costo de la electricidad, así como el consumo.

Marlon Abel Mosquera



3.5. Cargas eléctricas

Para este trabajo se estudian un hogar típico de Cuenca. Entendido hogar típico de Cuenca como una vivienda del sector residencial de la zona urbana de Cuenca, con un consumo mensual promedio de 240 kWh/mes, por lo que corresponde a la categoría de consumo del quinto estrato y no cuenta con subsidio, de acuerdo con el pliego tarifario del Ecuador [10]. Para simplificar el cálculo se suponen que todos los factores de potencia de los electrodomésticos son 1. La potencia total consumida por los electrodomésticos en una casa que trabaja en el intervalo de tiempo t – ésimo es:

$$P_L = \sum_{i=1}^A P'_i \Delta t u_i(t) \quad (3.9)$$

Donde A es el número de electrodomésticos involucrados en casa; P'_i es la potencia media del i – ésimo dispositivo; Δt es el lapso del intervalo de tiempo; $u_i(t)$ es una variable binaria, que representa el estado ON/OFF del i – ésimo aparato en el intervalo de tiempo t . Cuando el i – ésimo aparato está encendido, $u_i(t) = 1$; de lo contrario $u_i(t) = 0$.

3.5.1. Modelamiento para la programación de los electrodomésticos

Los electrodomésticos funcionan periodos de tiempo D_i . Están programados para iniciar su funcionamiento en el intervalo de tiempo S_i y continúa funcionando hasta el intervalo de tiempo E_i . Este requisito de funcionamiento continuo de la programación de cada electrodoméstico puede describirse de la manera siguiente:

$$\sum_{t=S_i}^{E_i} u_i(t)u_i(t+1)u_i(t+2)u_i(t+3)u_i(t+4)u_i(t+5)u_i(t+6) \cdots u_i(t+D_i-1) = 1 \quad (3.10)$$

Además, para asegurar el tiempo de funcionamiento de cada aparato, se utiliza la siguiente ecuación:



$$\sum_{t=1}^N u_i(t) = D_i \quad (3.11)$$

También se considera algunas limitaciones operativas, como la coordinación operativa entre la lavadora y la secadora eléctrica, la secadora debe funcionar después de la lavadora. Tal restricción de coordinación operativa puede describirse en la referencia [23].

$$S_n + D_n \leq S_m \quad (3.12)$$

Donde S_n y D_n son periodos de programación y duración de funcionamiento del dispositivo n , respectivamente; S_m es el período de programación del m –ésimo dispositivo.

3.6. Restricciones del sistema

A nivel de distribución de energía el sistema híbrido de baterías / sistema fotovoltaico tiene que satisfacer restricciones para el despacho de energía, la capacidad y el equilibrio del sistema. A continuación, se presenta las restricciones para cada uno de estas situaciones.

3.6.1. Restricciones de capacidad del sistema

El flujo de energía de cada componente no puede exceder la capacidad máxima correspondiente. Para este caso, las potencias $P_1(t), P_2(t), P_4(t)$ y $P_5(t)$ están limitadas a los componentes del sistema; el cargador AC, el controlador de carga solar y el inversor. Por lo que debe haber algunas limitaciones:

$$0 \leq P_i(t) \leq P_i^{max} \quad (3.13)$$



Donde $P_i(t)$ ($i = 1, 2, 4, 5$) son flujos de potencia marcados en la figura 3.2; y sus valores no son negativos en este trabajo. En cuanto a la capacidad del flujo de potencia del controlador de carga debe satisfacer:

$$0 \leq P_1(t) \leq \eta_S P_{SF}(t) \quad (3.14)$$

$$0 \leq P_2(t) \leq \eta_S P_{SF}(t) \quad (3.15)$$

Donde $P_{SF}(t)$ es la potencia de salida del sistema fotovoltaico en el momento t .

De la misma manera para el inversor, no se permite que exceda la capacidad del flujo máxima de potencia para su entrada:

$$0 \leq P_1(t) \leq \frac{P_I}{\eta_I} \quad (3.16)$$

$$0 \leq P_4(t) \leq \frac{P_I}{\eta_I} \quad (3.17)$$

Donde P_I es la capacidad máxima nominal del inversor.

En cuanto a la red eléctrica, esta incluye dos partes; la primera parte se utiliza para cargar el BT y la segunda parte para conectar los electrodomésticos directamente. Así, la potencia consumida en el tiempo t de la red eléctrica $P_G(t)$ es:

$$P_G = g_3(t)P_3 + P_5(t) \quad (3.18)$$

Además, hay una limitación para la red eléctrica $P_G(t)$. En ningún momento, no puede superar la potencia máxima de generación P_G^{max} , que está determinada por la utilidad y la limitación de capacidad de la acometida y el medidor de energía eléctrica:

$$0 \leq P_G(t) \leq P_G^{max} \quad (3.19)$$



3.6.2. Restricciones de flujo de potencia del sistema

Las restricciones del flujo de potencia del sistema son ecuaciones no lineales. Representan la operación mutuamente excluyente de la operación de los componentes del sistema. Por ejemplo, el BT no puede cargar y descargar al mismo tiempo. Se aplican las siguientes restricciones:

$$P_1(t) \cdot P_4(t) = 0 \quad (3.20)$$

$$g_3(t) \cdot P_4(t) = 0 \quad (3.21)$$

Además, por seguridad y una configuración más sencilla, no se debe permitir que el BT se cargue con dos fuentes de energía heterogéneas, es decir, la energía fotovoltaica y la energía de la red eléctrica; y el controlador de carga solar no puede cargar el BT y suministrar energía a los electrodomésticos de forma sincrónica. Estas restricciones se pueden expresar como:

$$P_1(t) \cdot g_3(t) = 0 \quad (3.22)$$

$$P_1(t) \cdot P_2(t) = 0 \quad (3.23)$$

Debido a que generalmente no se admiten múltiples fuentes de alimentación en un sistema de energía eléctrica simple, la demanda de carga de los residentes debe ser satisfecha únicamente una de las tres (es decir, el SF, el BT y la red eléctrica) en cualquier momento. Estas restricciones se pueden expresar como:

$$P_2(t) \cdot P_4(t) = 0 \quad (3.24)$$

$$P_1(t) \cdot P_5(t) = 0 \quad (3.25)$$

$$P_4(t) \cdot P_5(t) = 0 \quad (3.26)$$

3.6.3. Restricciones de equilibrio de potencia



La demanda de energía debe ser satisfecha por el flujo de energía del SF, el BT o la red eléctrica.

$$P_L(t) = \eta_I P_2(t) + \eta_I P_4(t) + P_5(t) \quad (3.27)$$

Donde η_I es la eficiencia energética del inversor y $P_L(t)$ representa la Potencia consumida en el instante t de los electrodomésticos.



Capítulo 4

4. Modelo de gestión óptimo para el sistema híbrido

Gestionar la energía del sistema híbrido baterías / sistema fotovoltaico en el hogar consiste en dos aspectos: 1) gestión óptima del sistema híbrido y 2) Incorporación de los conceptos DSM en el sistema híbrido. El primer aspecto se refiere al control del despacho de energía, el cual se hace mediante un sistema central que controla el despacho de energía, además de la carga y descarga de la batería. Esto debe hacerse de forma óptima. Para ello, existen diferentes estrategias que se diferencian por los objetivos que se persiguen. El trabajo de titulación se enfoca en una estrategia cuyos objetivos incluyen factores de decisión técnicos y económicos (sección 2.3.1.4.). La aplicación de dicha estrategia se hace mediante una técnica de optimización que, para este trabajo, se enfoca en la programación matemática no lineal (sección 2.3.3.2.). En cuanto al segundo aspecto se refiere a los conceptos DSM aplicables en un hogar. Esto se consigue mediante la programación de electrodomésticos, la cual, permite conseguir un ahorro de energía en el hogar y al mismo tiempo un incentivo económico. A continuación, se va a analizar las funciones objetivo que entran en el modelo de optimización, de las que se desea minimizar para lograr optimizar el sistema híbrido. Seguido a esto se plantea el problema PNLEM y define cada una de las partes que compone.

4.1. Modelo de Optimización

4.1.1. Función de optimización para el consumo de energía

A parte del rendimiento económico es indispensable prestar atención al rendimiento de ahorro de energía y los beneficios ambientales obtenidos. Desde el punto de vista del ahorro de energía y la protección del medio ambiente, minimizar el consumo de energía de la red también es importante y debe tomarse en cuenta [23]. En el sistema de energía de la red, el consumo de energía diario J_e se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$J_e = \sum_{t=1}^N [g_3(t)P_3 + P_5(t)]\Delta t \quad (4.1)$$



4.1.2. Función de optimización para el costo de energía

Para optimizar el costo de energía es necesario la programación de los electrodomésticos y el control de despacho de energía del sistema híbrido. El objetivo es minimizar la función de costo diario de energía para incentivar al usuario a someterse a las estrategias propias del sistema y al mismo tiempo las medidas DSM. La función de optimización de costo de energía toma en cuenta tanto el costo de la energía consumida de la red eléctrica, como el costo del uso de la batería:

$$J_C = \sum_{t=1}^N p(t)[g_3(t)P_3 + P_5]\Delta t + J_B \quad (4.2)$$

Donde $[g_3(t)P_3 + P_5]\Delta t$ es la energía total consumida por los electrodomésticos y el banco de baterías. $p(t)$ es el precio de la electricidad en un horario específico del día. J_B es el costo de desgaste del BT durante un día determinado. El costo de la batería se formuló en las ecuaciones (3.5), (3.6) y (3.7). Además, J_B está determinada por el funcionamiento del sistema de energía y, por lo tanto, no es un valor fijo.

4.1.3. Función de optimización del nivel de inconveniencia del usuario

El nivel de inconveniencia del usuario tiene que ver con la programación de los electrodomésticos que se hace en el sistema híbrido. El hecho de programar un electrodoméstico para que funcione a cierta hora del día repercute en incomodidad para el libre uso de parte del usuario del electrodoméstico. Por esa razón es importante minimizar el nivel de inconveniencia del usuario, para que la programación de los electrodomésticos sea aplicable en el sistema. La función que defina el nivel de inconveniencia del i – ésimo dispositivo viene definida de la siguiente manera:

$$\beta_i = \sum_{t=1}^N [u_i^{bl}(t) - u_i(t)]^2 \quad (4.3)$$

Dónde $u_i^{bl}(t)$ es una variable binaria, que representa el estado de conmutación de referencia de funcionamiento de la i – ésimo electrodoméstico en el intervalo



de tiempo t . Cuando $u_i^{bl}(t) = 0$, el i – ésimo aparato está apagado; de otra manera $u_i^{bl}(t) = 1$, el i – ésimo aparato está encendido. Los horarios habituales del uso de los electrodomésticos en el hogar se toman como horarios de referencia en este trabajo. El nivel de inconveniencia general β se utiliza para representar el inconveniente de programación total de todos los artefactos. Viene dado por la siguiente función:

$$\beta = \sum_{i=1}^A \gamma_i \cdot \beta_i \quad (4.4)$$

Donde γ_i es el factor de ponderación adjunto al i – ésimo aparato de acuerdo con la preferencia de los residentes.

4.1.4. Función Multiobjetivo

En escenarios del mundo real, los consumidores pueden esperar el menor costo operativo, el menor consumo de energía de red, así como el menor nivel de inconvenientes al mismo tiempo. No obstante, las operaciones orientadas al ahorro de dinero no siempre pueden resultar en la reducción del consumo de energía, y viceversa [23]. Por lo que es necesario disponer de una función multiobjetivo que tome en consideración tanto el costo operativo, consumo de energía e inconvenientes que pueda tener el usuario. La formulación se expresa como una suma ponderada de las funciones objetivo expresado en las ecuaciones (4.1), (4.2) y (4.4), de la siguiente manera:

$$Minf = \delta J_c + \alpha J_e + \theta \beta \quad (4.5)$$

Donde δ, α y θ son los factores de ponderación asociados a cada función objetivo que se busca minimizar; costo operativo, el consumo de energía y el nivel de inconveniencia según la preferencia de los residentes. Esta metodología de suma ponderada es capaz de expresar todos los sub-objetivos mediante la función objetivo general (4.5). Sin embargo, escoger los valores de los factores de ponderación para los usuarios puede ser un tema complicado. Otra solución al problema de optimización multiobjetivo se desarrolla aplicando el método de restricción, que trata de asignar a unas funciones objetivo como condiciones de restricción sujetas a una función objetivo escogida. Por ejemplo, si los residentes desean minimizar el consumo de energía y no están dispuestos a gastar hasta cierta cantidad de dinero J' , y tampoco les gusta



estar sujetos a un nivel de inconveniencia superior a β' . En ese caso, las funciones objetivo de costo y nivel de inconveniencia tomarían el papel de restricciones $J_c \leq J'$ y $\beta \leq \beta'$ sujetas a la función objetivo de consumo de energía $Min f = J_e$ del problema. Este es el método que se usará en el desarrollo del trabajo.

4.2. Problema PNLEM

4.2.1. Esquema general del problema PNLEM

El modelo de optimización que encaja para este sistema es el de programación no lineal de enteros mixtos (PNLEM) que combina una serie de ecuaciones y desigualdades lineales y no lineales compuesto por variables discretas, ya sean reales, enteras o binarias. El modelo PNLEM consta de la siguiente forma:

$$\begin{array}{l}
 \text{Función} \\
 \text{Objetivo:} \\
 \\
 \min_x f(x) \\
 \\
 \text{Sujeto a:} \left\{ \begin{array}{l}
 r_u \leq Ax \leq r_b \\
 A_{eq}x = b_{eq} \\
 l_b \leq x \leq u_b \\
 c_l \leq C(x) \leq c_u \\
 C_{eq}(x) = d_{eq} \\
 x_i \in Z \\
 x_j \in \{0,1\}
 \end{array} \right. \quad (4.6)
 \end{array}$$

Donde $f(x)$ es la función objetivo del problema que se busca minimizar. Está sujeta a las siguientes restricciones:



Desigualdades lineales: A es una matriz rectangular de dimensión $m \times n$, r_u y r_b son vectores de dimensión $m \times 1$;

Igualdades lineales: A_{eq} es una matriz rectangular de dimensión $m \times n$ y b_{eq} es un vector de dimensión $m \times 1$;

Límites de las variables de decisión: l_b y u_b indican el límite inferior y superior de las variables respectivamente;

Desigualdades no lineales: $C(x)$ es un vector de funciones de dimensión $u \times 1$ que contiene restricciones de desigualdad, c_l y c_u son vectores de dimensión $u \times 1$ que representan los límites inferior y superior de las desigualdades no lineales;

Igualdades no lineales: $C_{eq}(x)$ es un vector de funciones de dimensión $u \times 1$ que contienen restricción de igualdad, d_{eq} es un vector de dimensión $u \times 1$;

Variables discretas: x_j son variables de decisión que deben ser números binarios;

Variables continuas: x_i son variables de decisión que deben ser números reales, donde $i \neq j$.

4.2.2. Planteamiento del problema PNLEM

Las variables binarias representan el estado de encendido y apagado de los 8 electrodomésticos $u_i(t)$ que se van a controlar junto con la carga y descarga de la batería $g_3(t)$ desde la red, que para este caso se comporta como un artefacto más. Las variables continuas ($P_1(t), P_2(t), P_4(t), P_5(t)$) representan el flujo de potencia suministrada desde la red, los paneles solares y descarga del BT (figura 3.2). Los límites inferiores y superiores $l_b \leq x \leq u_b$ de las variables están regidos por la capacidad del sistema (sección 3.6.1). En cuanto a las variables binarias, estas conforman solamente dos valores 0 ó 1.

Adicionalmente el modelo de optimización cuenta con restricciones, las cuales ya se plantearon en el capítulo 3 al modelar matemáticamente cada una de las partes del sistema híbrido. Las restricciones del sistema que conforman las ecuaciones lineales $A_{eq}x = b_{eq}$ son la ecuación (3.7), (3.11) y (3.27). Las restricciones (3.4) forman las desigualdades lineales $r_u \leq Ax \leq r_b$. Las restricciones (3.10), (3.20) – (3.26), en cambio forman las ecuaciones no lineales $C_{eq}(x) = d_{eq}$. Y finalmente para las desigualdades no lineales $c_l \leq$

Marlon Abel Mosquera



$C(x) \leq c_u$, se usa la fórmula (4.4), al restringir el nivel de inconveniencia a un valor apropiado para el usuario.

Todas estas restricciones van sujetas a minimizar una de las tres funciones objetivos planteados en la sección 4.1, que específicamente pueden ser las ecuaciones (4.1) o (4.2). La función objetivo (4.4) se asigna como una restricción del sistema. La idea es minimizar tanto el costo como el consumo de energía teniendo en cuenta el nivel de inconveniencia del usuario.

Para resolver el problema PNLEM se necesita de una herramienta computacional, hay varios programas que pueden resolver un problema PNLEM. Para este trabajo se utilizará un solucionador gratuito SCIP, desarrollado de las herramientas OPTI de MATLAB [51].



Capítulo 5

5. Análisis del sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico de energía doméstica

5.1. Acotación y Clasificación de los electrodomésticos utilizados en un hogar

OLADE (Organización Latinoamericana de Energía) presenta la desagregación de energía para el sector residencial de acuerdo con el uso y fin que se le da a la energía, clasificándose en 4 partes [42]; calor, fuerza mecánica, iluminación y otros (Tabla 5.1). Esto permite tener una noción clara sobre el uso final de la energía eléctrica para la clasificación de los diferentes electrodomésticos de un hogar típico de Cuenca.

De acuerdo con el modelo de conmutación simple del sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico en el hogar conectado a la red, existe restricciones operativas en los que se aplican periodos de muestreo de 10 minutos [23]. Por lo tanto, para fines de estudio, una condición indispensable que debe cumplir un electrodoméstico es que su periodo de funcionamiento sea superior a 10 minutos. Además, el artefacto debe ser relevante en cuanto a potencia y frecuencia de uso días/mes. También se acotará el estudio para consumidores que no cuentan con subsidio, que de acuerdo con el pliego tarifario del Ecuador es superior a 110 kWh/mes para la región sierra [10].

Tabla 5.1 - Desagregación por uso que se le da a la energía eléctrica [42].

Sector Residencial	Calor	Calefacción	Calefactor, Plancha de pelo, plancha de ropa
		Cocción	Cafetera, Tostadora, arrocera, Estufa, Cocina de Inducción, microondas, waflera
		Calentamiento de Agua	Ducha eléctrica, EWH (Calentador de Agua)
	Fuerza Mecánica	Aire Acondicionado	Aire acondicionado
		Ventilación	Ventilador
		Refrigeración	refrigeradora
		Bombeo de Agua	Bomba de agua
		Fuerza Mecánica	Licuada, Extractor de jugo, juguera, lavadora, secadora
	Iluminación	Iluminación	Focos ahorradores (leds, fluorescentes)
	Otros	Dispositivos electrónicos	Tv, PC, sonido, cargadores, comunicación, generador de ozono, etc



En base a la clasificación de la tabla 5.1 se enumera cada electrodoméstico utilizado en el hogar (Tabla 5.2), tomando en cuenta: potencia de cada electrodoméstico, el periodo de funcionamiento y la frecuencia de uso de días/mes. Esto se consiguió en base a mediciones hechas en dos hogares de Cuenca y a la investigación del uso de los electrodomésticos.

Tabla 5.2 - Artefactos utilizados en un hogar

Tipo de Carga	Artefacto	Potencia (watts)	Periodo de funcionamiento (min.)	Consumo Diario kWh/día	Consumo General diario	USO	Frecuencia de Uso días / mes	Consumo Mensual kWh/mes	Consumo General Mensual
Fija	MODEM	2.7	1440	0.06	0.74	Otros	30	1.94	22.14
Fija	PC	50	610	0.51			30	15.25	
Fija	TV	50	180	0.15			30	4.50	
Flexible	Generador de ozono	18	5	0.00			60	0.09	
Flexible	Cargador de tablet	3	300	0.02			20	0.30	
Fija	Cargador de celular	1.7	60	0.00			30	0.05	
Fija	Equipo de Sonido	125	120	0.25			1	0.25	
Fija	Iluminación	100	310	0.52	0.52	Iluminación	30	15.50	15.50
Desplazable	Secadora	600	60	0.60	8.24	Fuerza Mecánica	24	14.40	231.10
Desplazable	Lavadora	400	50	0.33			24	8.00	
Desplazable	Exprimidor de Jugo	25	10	0.00			8	0.03	
Desplazable	Juguera	200	0.25	0.00			30	0.03	
Flexible	lavavajillas	1800	150	4.50			30	135.00	
Desplazable	Licuada	270	0.33	0.00			30	0.05	
Desplazable	Aspiradora	1200	20	0.40			4	1.60	
Fija	Refrigeradora	100	1440	2.40	30	72.00			
Desplazable	Ducha eléctrica	4500	30	2.25	18.67	Calor	30	67.50	583.11
Flexible	Calefactor	1200	120	2.40			30	72.00	
Desplazable	Microondas	1300	3	0.07			30	1.95	
Desplazable	Tostadora	950	2	0.03			4	0.13	
Desplazable	Calentador de agua (EWH)	3000	240	12.00			30	360.00	
Desplazable	arrocera	1000	20	0.33			30	10.00	
Desplazable	Cafetera	600	20	0.20			60	12.00	
Desplazable	Estufa	1900	30	0.95			60	57.00	
Desplazable	Plancha de ropa	1000	5	0.08			12	1.00	
Desplazable	waflera	1000	20	0.33			4	1.33	
Desplazable	plancha de pelo	75	20	0.03			8	0.20	
TOTAL				28.170				851.85	851.85



Las celdas verdes de la tabla 5.2 son los electrodomésticos que no tienen relevancia en el consumo de energía diaria y mensual, periodo de funcionamiento y frecuencia de uso de número de días al mes (día / mes), por lo que son descartadas. En cambio, las celdas color menta son electrodomésticos con una demanda significativa, periodo de funcionamiento superior a 10 minutos y uso frecuente de días/mes. De estos 11 diferentes tipos de electrodomésticos que cumplen los estándares de relevancia en cuanto al consumo diario y mensual, se descarta la ducha eléctrica, Calentador de agua, Lavavajillas y olla arrocera porque son artefactos que en la actualidad no se usan en muchos hogares de Cuenca. Por ejemplo, la ducha eléctrica y olla arrocera es reemplazada por calefón y cocina a gas, debido al bajo coste. Por lo que resulta poco común que un hogar típico de Cuenca utilice estos electrodomésticos. En cuanto al calentador de agua, de acuerdo con PLANEE (Plan de gestión de eficiencia energética) una de las metas es incentivar el uso de calentadores de agua y cocina de inducción mediante un ahorro en el coste de energía para el usuario final [8]. Sin embargo, hasta la fecha la gran mayoría de consumidores de Cuenca no han optado por el uso de estos electrodomésticos. Además, no se colocó la cocina de inducción por su uso independiente de consumo trifásico que provee la empresa distribuidora de energía, que difícilmente puede ser suplida por paneles solares y baterías. Con todos estos criterios tomados en cuenta, se llegó finalmente a escoger 8 electrodomésticos: refrigeradora, lavadora, secadora, cafetera, computador portátil, TV, Calefactor y la Iluminación LED.

5.2. Mediciones de consumo de los electrodomésticos

Para obtener la curva de demanda de los 8 electrodomésticos, se midió el consumo de energía mediante un registrador de energía diseñado con este propósito. El registrador de energía (datalogger) se programó con una placa Arduino uno y ensamblaje de módulos de reloj, microSD, elevador de voltaje DC - DC y circuito acoplador de señal, los cuales, son una opción económica y flexible a la hora diseñar un registrador de energía con capacidad de medir potencia instantánea de hasta 4 diferentes electrodomésticos sincronizados en tiempo real y con capacidad de guardar información de consumo de varios meses. En la figura 5.1 y 5.2 se pueden apreciar la parte interna y externa del registrador de energía. El registrador de energía cuenta con dos baterías de litio de 2800 mAh de 3.85 v, permitiendo un día y medio de autonomía. También cuenta con un adaptador para cargar las baterías y el funcionamiento continuo del mismo.



Figura 5.1 - Registrador de energía (Parte interna)



Figura 5.2 - Registrador de energía (Parte externa)

La medición de energía se hizo con sensores de corriente SCT – 013, los cuales no son invasivos, simplemente se colocan en una de las líneas fase – neutro del electrodoméstico. El tiempo de muestreo para registrar la energía consumida fue de un segundo, la cual es más que favorable, ya que permite analizar el flujo de potencia que consume cada electrodoméstico y de acuerdo a eso hacer una proyección del consumo de energía. A continuación, se presenta los resultados de las mediciones de los electrodomésticos.

5.2.1. Refrigerador

La potencia de un refrigerador de etiqueta energética, clase A (menor consumo de energía), es de 100 watts (figura 5.3), con picos transitivos de potencia de 1000 watts en intervalos de tiempo de 1 segundo. Como se aprecia en la figura 5.3 el patrón de consumo del perfil de carga es continuo y se mantiene en uso las 24 horas del día. El consumo de energía de un día completo es de 1193.8 kWh/día.

Marlon Abel Mosquera

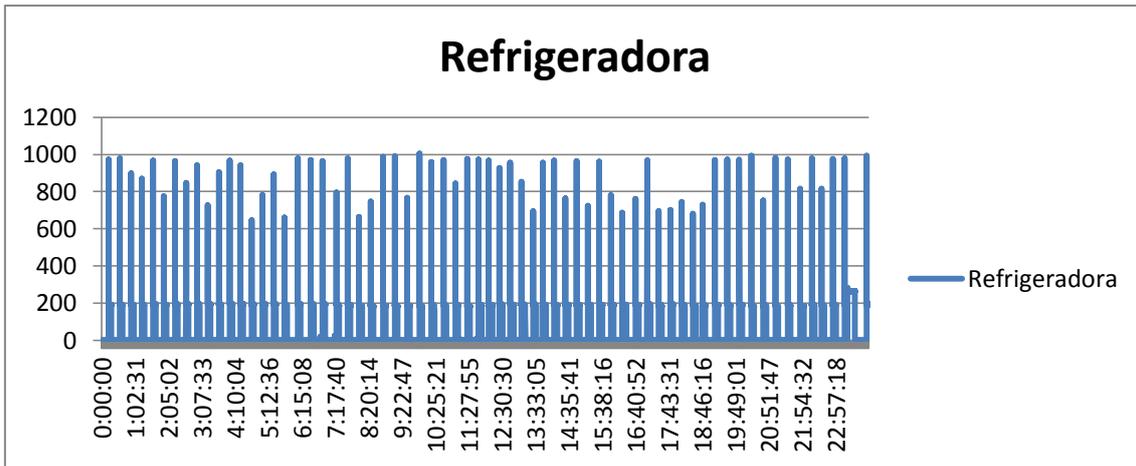


Figura 5.3 - Perfil de carga de una refrigeradora.

5.2.2. Secadora

De acuerdo con la figura 5.4 una secadora tiene una potencia promedio de 600 watts. Si analizamos el flujo de potencia que consume este electrodoméstico hay intervalos de tiempo de 20 segundos que absorbe 800 watts de potencia instantánea llegando a potencias máximas de 1200 watts. Debido a que una secadora es una carga de fuerza mecánica, el motor monofásico de corriente alterna, presenta picos transitivos de consumo. El periodo de funcionamiento de una secadora es de 45 minutos aproximadamente. La secadora se usa en horarios de la mañana y tarde; de 10:34 – 13:02. Como la secadora funciona conjuntamente con la lavadora, se establece una condición operativa en forma secuencial, en donde funcione primero la lavadora seguido de la secadora. El consumo de energía de una secadora en un día es de 1074.05 kWh/día.

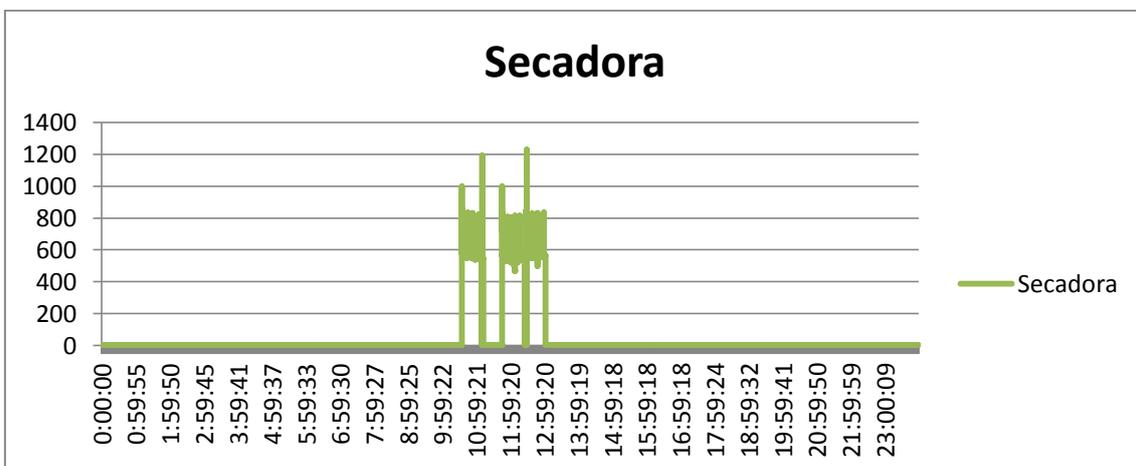


Figura 5.4 - Perfil de Carga de una secadora doméstica.

5.2.3. Lavadora

De manera parecida con la secadora debido a que es una carga de fuerza mecánica el patrón de consumo presenta picos de corriente, que se expresa en potencia máxima de 380 watts y potencia promedio de 124 watts. El periodo de funcionamiento de una lavadora, de acuerdo con la figura 5.5, es de 60 minutos. En este caso funciona en dos horarios; en la mañana de 7:05 - 8:05 y 10:42 – 11:42. El consumo de energía de una lavadora de acuerdo en un día es de 464. kWh/día.

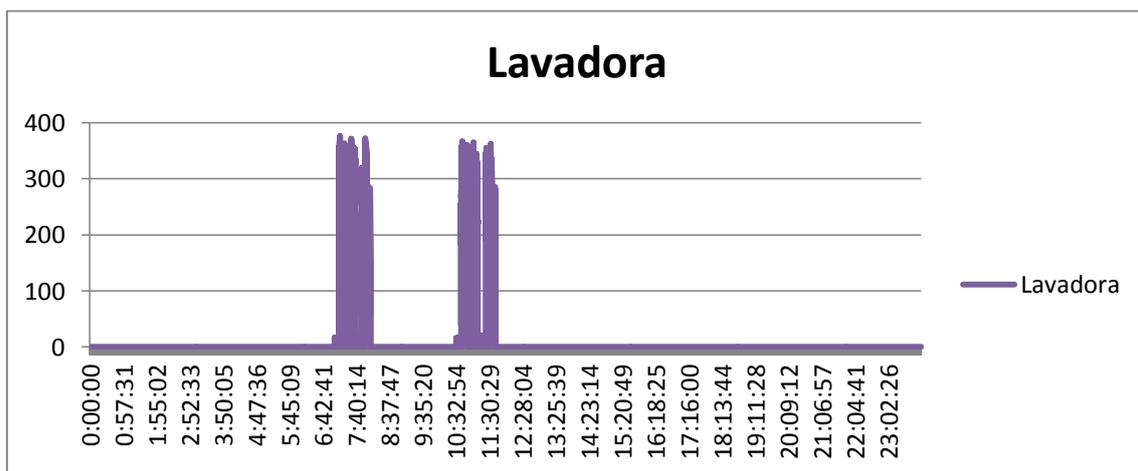


Figura 5.5 - Perfil de carga de una lavadora.

5.2.4. Televisión

El perfil de carga de una televisión mostrado en la figura 5.6 cuenta con una potencia promedio de 50 W. Si analizamos este tipo de carga, podemos ver que mantiene un consumo estable de energía con una potencia máxima de 55 W. El periodo de funcionamiento de uso depende del usuario, que en este caso se estima en 150 minutos en horarios de 20:30 – 23:00. El consumo de energía de la televisión de acuerdo con la figura 5.6 es de 120.8 kWh/día.

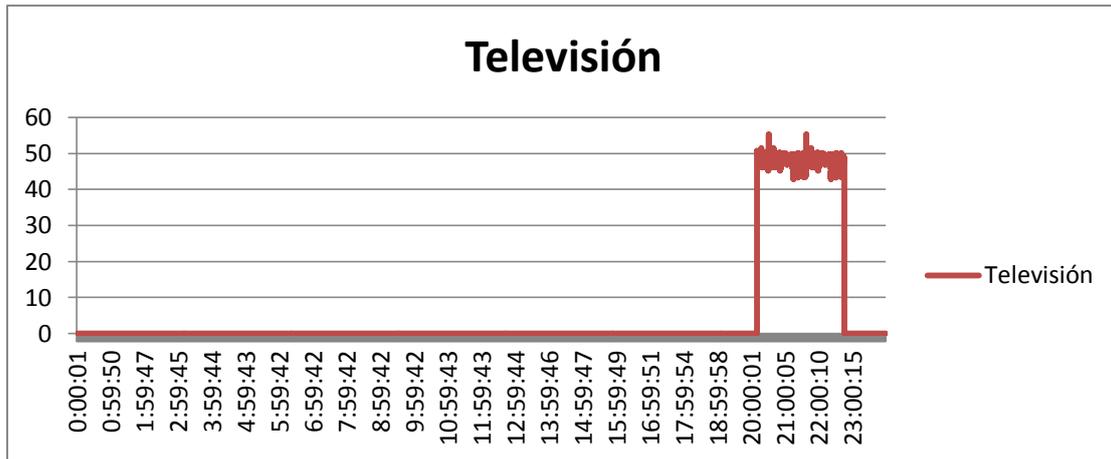


Figura 5.6 - Perfil de Carga de una Televisión.

5.2.5. Cafetera

En la figura 5.7 se puede apreciar el perfil de carga de una cafetera, con una potencia promedio de 300 W, pero si analizamos el flujo de potencia, esta se mantiene en 600 W ya que cuenta con un termostato que estabiliza la temperatura, al conectar/desconectar automáticamente el electrodoméstico haciendo que el consumo de energía sea intermitente. Una cafetera entra dentro de los electrodomésticos que generan calor para la cocción, por lo que es una carga resistiva. El periodo de funcionamiento de la cafetera es de 16-35 minutos aproximadamente. Los horarios en los que se utiliza es la mañana 8:53 – 9:14, 9:55 – 10:21 y en la noche 19:20 – 19:56. El consumo de energía de una cafetera es de 228.12 kWh/día.

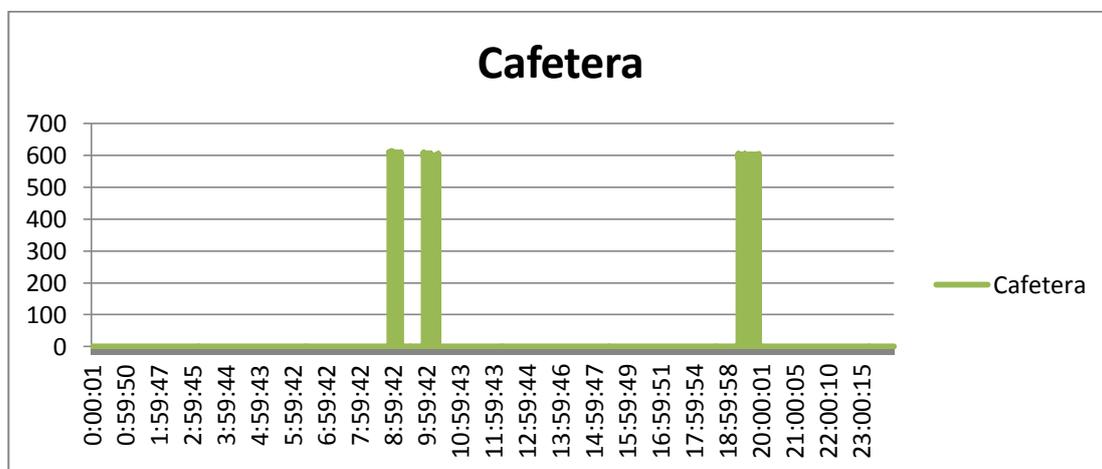


Figura 5.7 - Perfil de Carga de una Cafetera.

5.2.6. Iluminación

En la figura 5.8 podemos apreciar el comportamiento del consumo de la iluminación LED de un día completo. En la madrugada 00:00 – 6:00 no se presenta demanda, en la mañana a partir de 6:00 – 19:00 el consumo es mínimo, prácticamente representa el consumo de dos focos LED 20 W y en la noche 19:00 – 23:00 el consumo empieza a ser más relevante con una potencia promedio de 85 W y potencia máxima de 111 W. El consumo de energía de un día completo por iluminación LED es de 450 kWh/día.

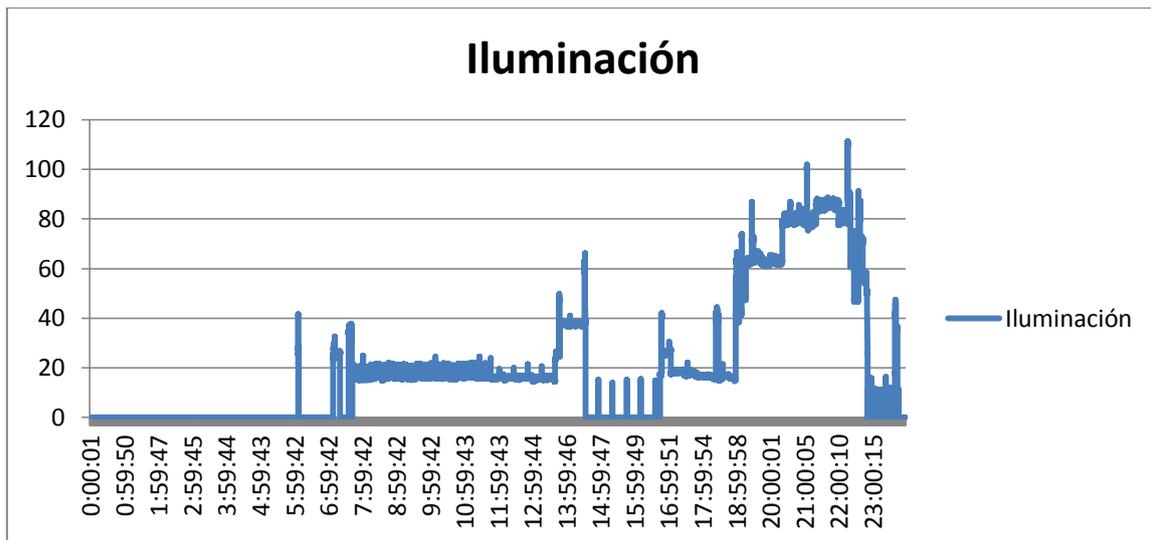


Figura 5.8 - Perfil de carga de iluminación LED.

5.2.7. Computador Portátil

El perfil de carga de un computador portátil se puede apreciar en la figura 5.9 con una potencia promedio de 61.6 W y una potencia máxima de 94.84 W. El periodo de funcionamiento es de 10 horas a partir de las 8:00 hasta las 18:00. El consumo de energía en un día es de 594.3 kWh/día.

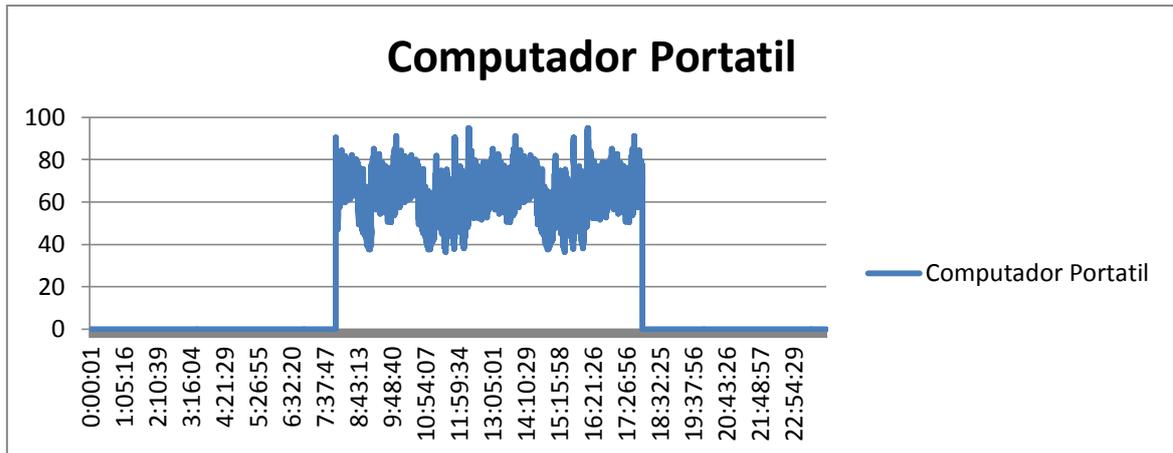


Figura 5.9 - Perfil de carga de un computador portátil.

5.2.8. Calefactor

La estufa o calefactor es un electrodoméstico que emite calor para calentar ambientes. El perfil de carga de un calefactor se puede apreciar en la figura 5.10. La potencia promedio es de 1051 W y presenta una potencia máxima de 1304 W. Además, el periodo de funcionamiento es de 120 minutos aproximadamente. Este tipo de electrodoméstico es un tipo de carga desplazable por lo que puede utilizarse tanto en la noche, en la madrugada o en la mañana. El horario que se utiliza es 21:02 – 23:03. El consumo de energía en un día es de 2041 kWh/día.

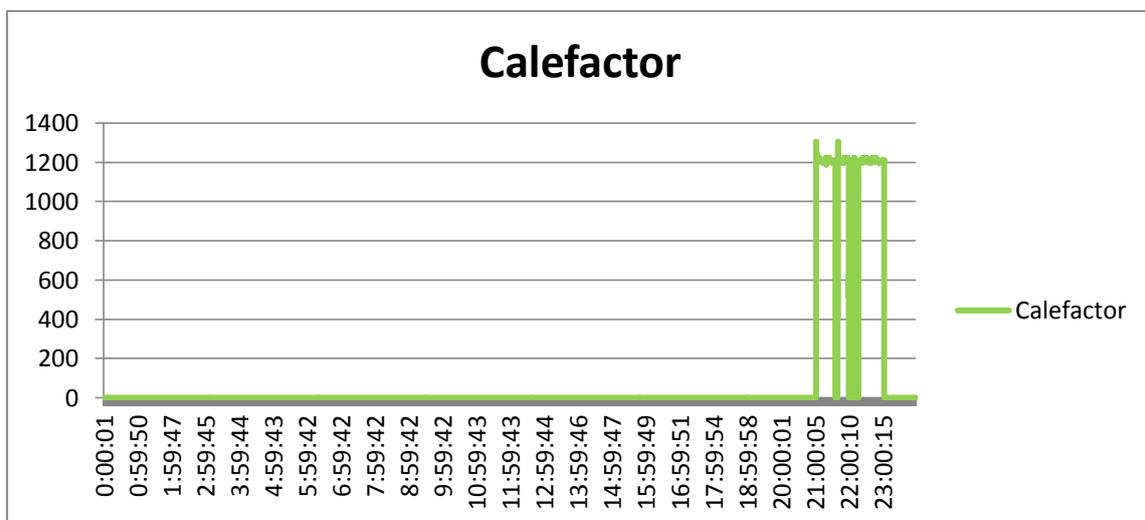


Figura 5.10 - Perfil de Carga de un Calefactor.



5.3. Descripción de un hogar típico de Cuenca

Se elige un hogar típico de Cuenca/Ecuador como caso de estudio. Para ello se consideran los datos de los electrodomésticos principales y perfiles de uso. La corriente máxima suministrada al hogar por la empresa distribuidora CENTROSUR está limitada a 50 A y voltaje de la red de 120V [43]. Como se muestra en la tabla 5.3, los ocho electrodomésticos más utilizados se seleccionan como representantes de las tres categorías. El tiempo de las cargas fijas no se puede modificar en absoluto. El tiempo de trabajo de las cargas desplazables se puede cambiar dentro de un periodo preferido limitado. Y las cargas flexibles se pueden programar en cualquier momento.

Tabla 5.3 - Cronograma de electrodomésticos utilizados en un hogar típico de Cuenca

Índice	Accesorios	pi(1,2,3,...,8)	Duración	Inicio-fin	
				Si	Ei
Ai		Potencia	Di(Min)		
Desplazable					
1	Secadora	0.6	50	63 75	67 79
2	Lavadora	0.38	60	42 65	47 70
3	Cafetera	0.6	20	45 108	46 109
Fijas					
4	Computadora Portátil	0.05	600	48	107
5	Televisor	0.05	180	121	138
6	Iluminación	0.1	240	114	138
7	Refrigeradora	0.1	1440	1	144
Flexible					
8	Calefactor	1.2	120	126	137

En la Tabla 5.3, se presenta la potencia promedio de cada aparato de acuerdo con los valores medidos. Se recopilieron los datos de un día de la semana sobre el uso de electrodomésticos en el hogar de estudio. La información sobre Si y Ei como inicio y finalización del intervalo de tiempo en el que se programará el aparato se registra en la Tabla 5.3 según el hábito preferido de los residentes. Estos datos de uso habitual enumerados en la última columna de la Tabla 5.3 se toman como programa de referencia. Por ejemplo, el artefacto A1 tiene una potencia nominal de 0.6 kW, que está programado dos veces al día, para trabajar 50 minutos en la mañana y tarde. De acuerdo con el horario de referencia debe activarse al comienzo de la franja horaria 63 (10:30) y la franja horaria 75 (12:30), y apagarse al final de la franja horaria 65 (11:10)

Marlon Abel Mosquera



y la franja horaria 79 (13:10), respectivamente. Desde la perspectiva DSM, la secadora, como una especie de electrodoméstico desplazable que pueden cambiar el horario de trabajo, podría encenderse entre las 10:00 – 16:00 de acuerdo con el uso habitual de los usuarios y para tener la libertad de usar la generación de energía de los paneles solares. De igual manera la lavadora (artefacto A2) como es una carga desplazable puede cambiar el horario de trabajo entre las 10:00 – 16:00, con la condición de que se active primero la lavadora y después la secadora. La refrigeradora, como carga fija, debe estar encendida durante todo el día, y su potencia nominal se estima aproximadamente dividiendo la energía total consumida durante un día en 24 h en partes iguales. Para un hogar convencional sin fuentes renovables y sistemas de almacenamiento de energía, es decir, la red es la única fuente de energía, es fácil calcular que el consumo de energía de la red de estos ocho electrodomésticos y la factura de electricidad correspondiente durante un día con el horario de referencia es 8 kWh/día y \$0.792. El perfil de consumo de energía de referencia durante un día se muestra en la figura 5.11.

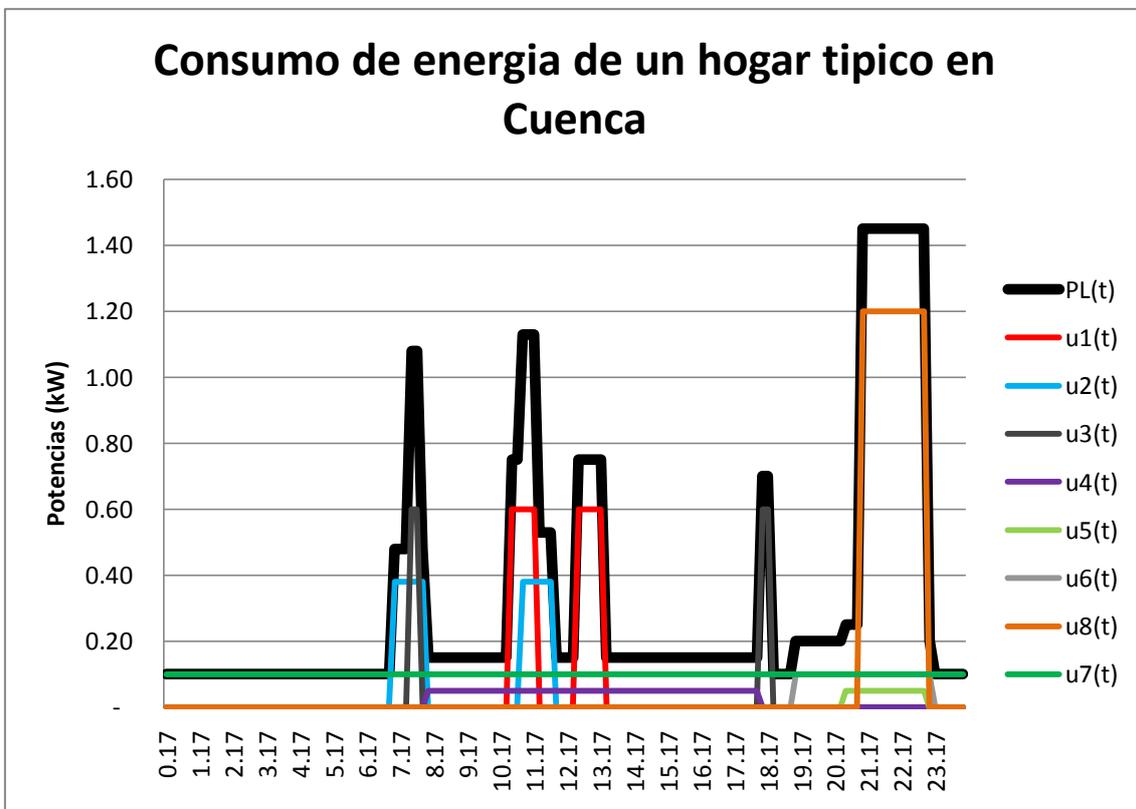


Figura 5.11 - Perfil de energía de referencia.



5.4. Características y límites de despacho del sistema híbrido baterías/ sistema fotovoltaico

Para satisfacer el consumo de energía presentado en la figura 5.11, se cuenta con el despacho de energía de la red de distribución con capacidad máxima de 6kW y también de la energía de los paneles solares. Los datos de producción de energía de los paneles solares se obtuvieron de las mediciones hechas en el “Eco Campus de Balzay” de un día típico. El patrón de curva obtenido se muestra en la figura 5.12, con pasos de 10 minutos y generación de 4.19 kWh/día y despacho máximo de potencia de 0.8 kW.

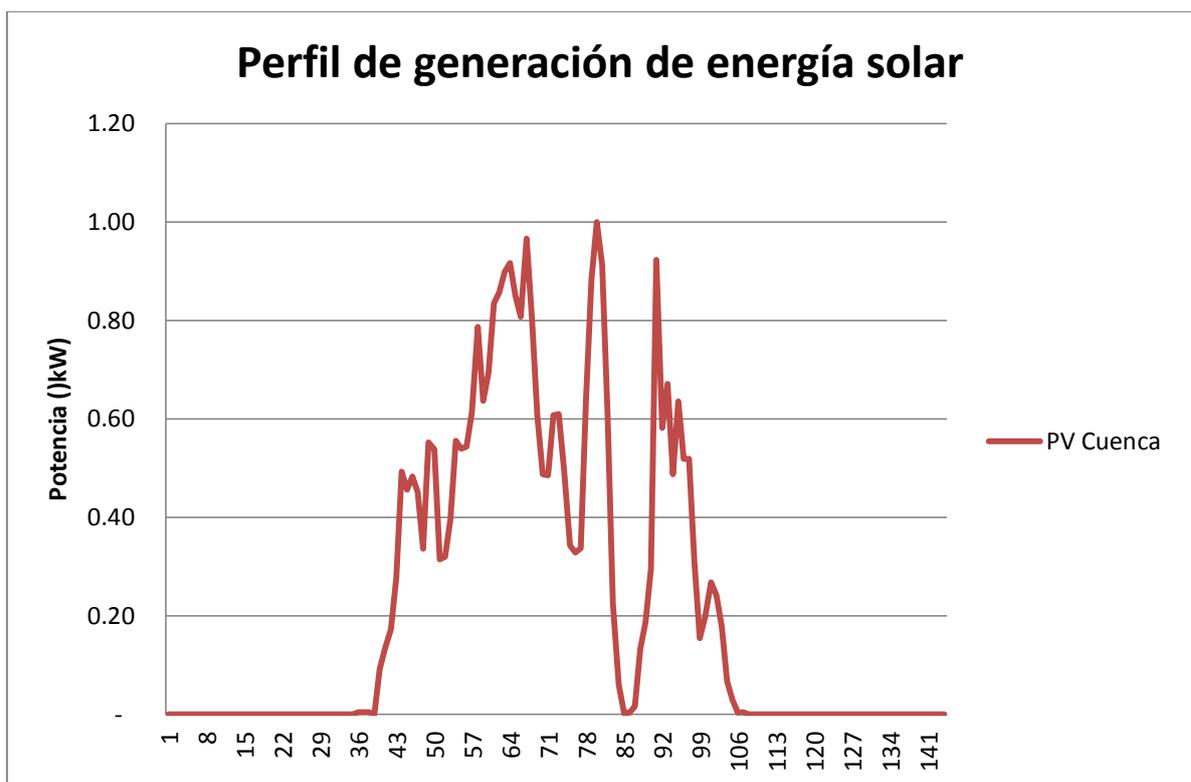


Figura 5.12 - Perfil de generación de energía fotovoltaica.

Los límites de energía para el sistema híbrido se obtuvieron de la empresa AutoSolar, en el que facilitan un kit de acuerdo a las capacidades requeridas. El kit compone una batería AGM, paneles solares y un inversor; además de estructura coplanar, cables y demás elementos para la instalación del sistema. La energía captada en un día, para este kit es de 2.4 kWh/día en invierno y 5.6 kWh/día en verano. A continuación, se presenta las características de cada elemento del sistema híbrido.



5.4.1. Sistema Fotovoltaico

El sistema fotovoltaico está compuesto por 5 paneles solares policristalino de 72 células, de 0.2 kW de capacidad a 12 V cada uno [44].

5.4.2. Sistema de Batería

Para almacenar la energía eléctrica se va a usar una batería con tecnología AGM de 12V y 300 Ah [25]. De acuerdo con las especificaciones esta batería está preparada para descargas profundas y con un uso del 30% se duplicará la vida de la batería con facilidad, superando los 1500 ciclos de uso. Se supone que el estado inicial de la energía almacenada en la batería es 91% $C^{máx}$, después de haber transcurrido tres meses. El coeficiente de eficiencia de la batería es 100%. El costo de la batería se calcula de 0,27 \$/kWh de acuerdo con la ecuación 3.7 y el costo de la batería (tabla 2.2), teniendo en cuenta que es una batería que no requiere mantenimiento [45]. Para cargar la batería mediante la red eléctrica se utiliza el cargador AC del inversor que, de acuerdo con las especificaciones del fabricante, se debe hacer con un voltaje que oscile de 14.1-14.4V y corriente máxima de 20 A. Para un funcionamiento adecuado del inversor y la carga de la batería se estima 14.2V y 18.75A, resultando en una potencia P_3 de 270 W aproximadamente.

5.4.3. Inversor

El inversor Must Solar es un inversor de onda pura con cargador AC y regulador de carga tipo PWM. Tiene una potencia nominal de 1000 W con regulador de carga PWM de 50 A y cargador de batería máximo de 20A funcionando con una eficiencia del 93%. Debido a sus características de multifunción facilita el control y monitoreo del sistema híbrido [50].

En base a lo mencionado en la sección 5.4 se resume los parámetros del sistema en la tabla 5.4.



Tabla 5.4 - Parámetros del sistema híbrido [43][25][44][10][45].

Máximo despacho de energía de la red eléctrica (P_{Gmax})	6 kW
Capacidad de los paneles solares	1 kW
Capacidad de la batería ($C^{máx}$)	3.6 kWh
Costo de la red eléctrica por kWh	0,099 \$/kWh
Costo de la batería por kWh	0,27 \$/kWh
Estado inicial de energía de BT	91% $C^{máx}$
Profundidad de descarga	30%
P_{5max}	6 kW
P_3	0.27 kW
ηc	93%
ηl	93%
ηs	93%

En el sistema híbrido batería/sistema fotovoltaico se estableció un modelo de conmutación simple, el cual implica, un grupo de variables de control que deben calcularse para el problema de optimización. En conjunto se tiene que controlar 1296 variables binarias y 576 variables reales no negativas. Las variables binarias representan el estado de conmutación de los 8 aparatos ($u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7$ y u_8) y el cargador de CA (g_3) compuesto de 144 intervalos de tiempo durante un día, y las variables reales representan los flujos de energía P_1, P_2, P_4 y P_5 durante cada intervalo de tiempo durante un día.

5.5. Planteamiento del problema

En el capítulo 4 se planteó el modelo de gestión óptimo del sistema híbrido compuesto por funciones objetivo y restricciones que modelan matemáticamente el sistema. En esta sección se va a definir las funciones objetivo y restricciones que se van a utilizar para la simulación, de acuerdo con el perfil de consumo de un hogar típico de Cuenca (figura 5.11); al cronograma de los electrodomésticos (Tabla 5.3); y los parámetros del sistema híbrido (Tabla 5.4).

5.5.1. Función Objetivo

El sistema híbrido está compuesto por dos funciones diferentes. La primera es para minimizar el consumo de energía y la segunda para minimizar el costo de la energía incluido el costo de la batería (Figura 5.13).

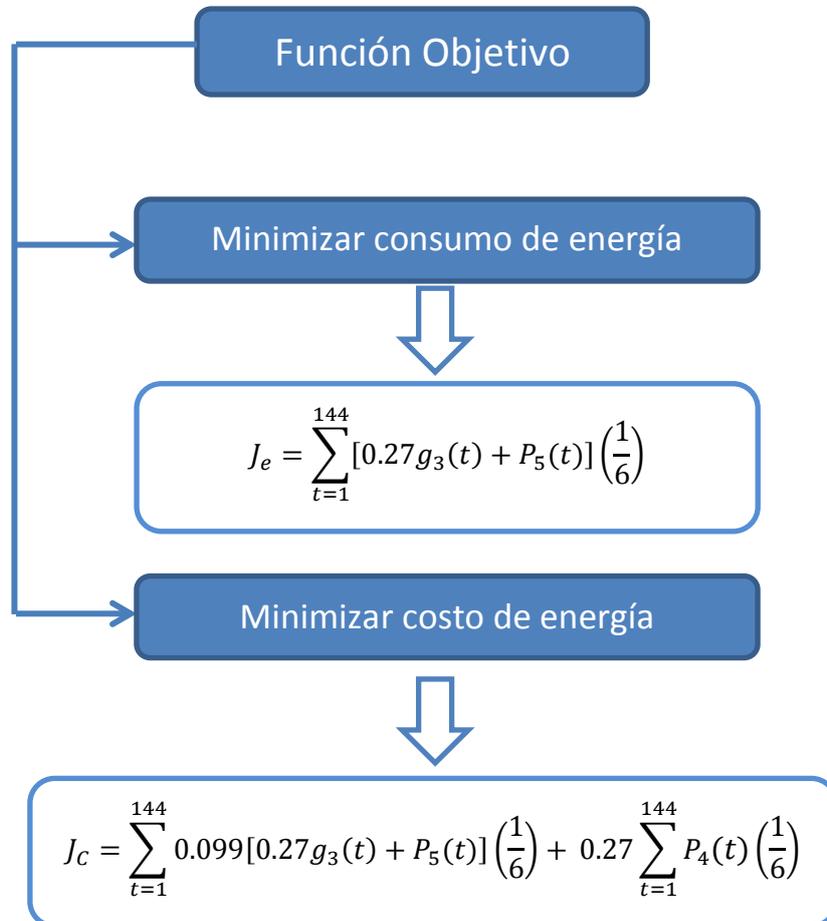


Figura 5.13 - Funciones objetivo utilizadas para la simulación del sistema híbrido.

5.5.2. Restricciones del problema

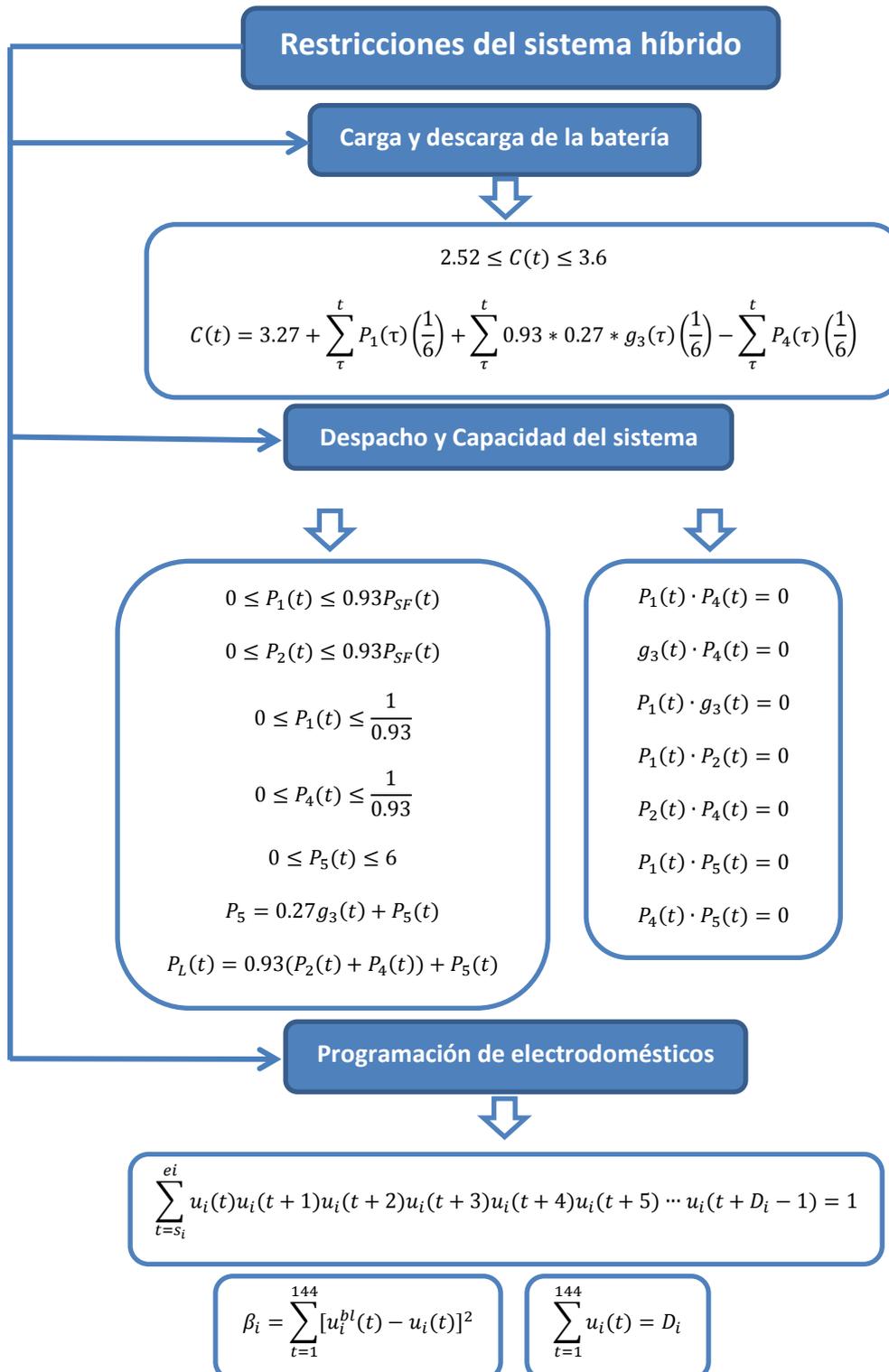


Figura 5.14 - Restricciones del problema utilizadas para la simulación del sistema híbrido.

5.6. Simulación y Análisis

Para la simulación se analizan 6 escenarios diferentes para minimizar el consumo y el costo de la energía cambiando el patrón de consumo de energía y sin cambiarlo. La simulación se realizó en Matlab utilizando las herramientas de Opti – Toolbox con el solucionador SCIP.

- 1) Si el residente solo tiene en cuenta el consumo de energía, la estrategia de operación óptima puede derivarse resolviendo la función objetivo $Min. f = J_e$. En ese caso, el consumo de energía se calcula como 4.7 kWh, y el ahorro de energía es 41.4% en comparación con el consumo de energía del cronograma de referencia de 8.02 kWh. El costo correspondiente es \$1.23. La figura 5.15 muestra un perfil de despacho óptimo de energía en una aplicación práctica.

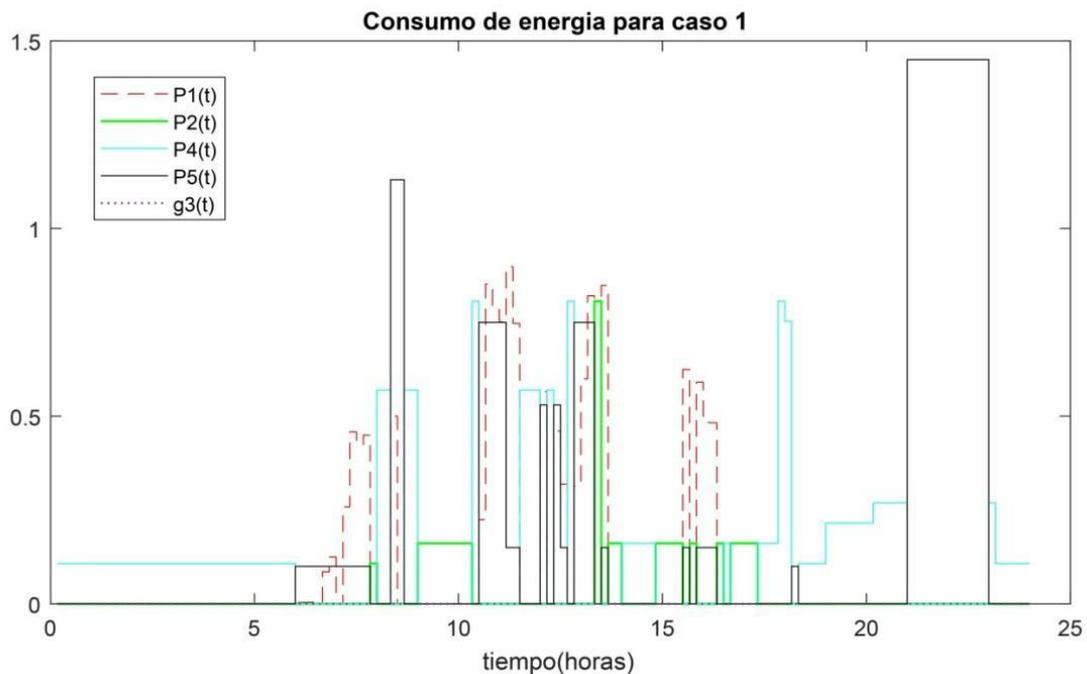


Figura 5.15 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el consumo de energía.

- 2) Si el residente solo tiene en cuenta el costo, la estrategia de operación óptima puede derivarse resolviendo la función objetivo $Min. f = J_C$. En ese caso, el costo se calcula como \$0.64, y el ahorro de costos es del 20% en comparación con el costo del cronograma de referencia de \$0.8. El consumo de energía correspondiente es de 6.43 kWh. La figura 5.16 muestra un perfil de despacho óptimo de energía en una aplicación práctica.

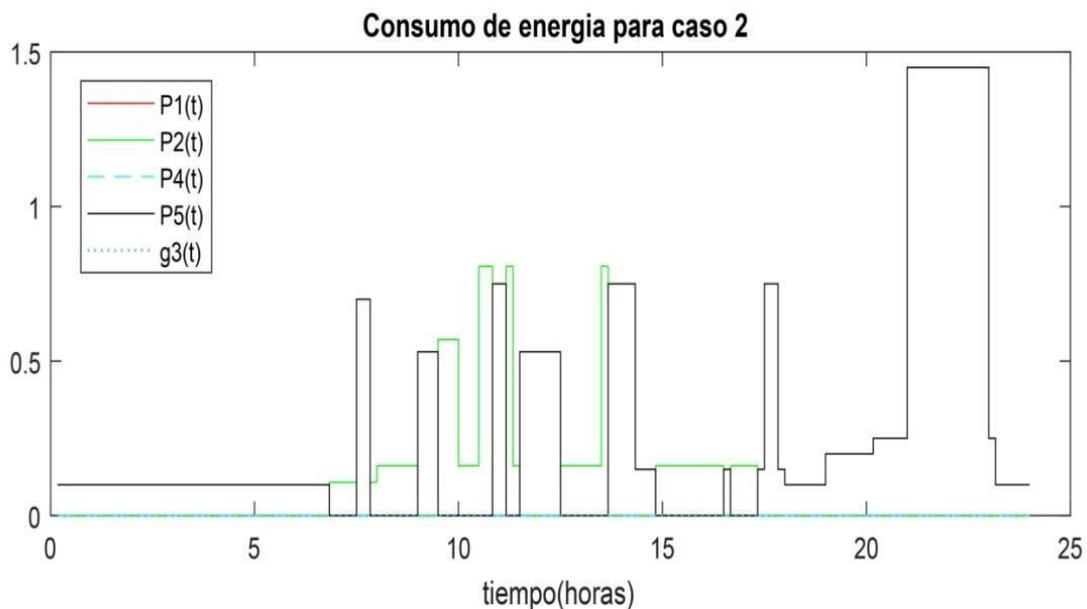


Figura 5.16 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el costo de la energía.

- 3) Si el residente toma en consideración el consumo de energía y no le gustaría cambiar el cronograma de referencia de los electrodomésticos, la estrategia de operación óptima puede derivarse resolviendo la función objetivo $Min. f = J_e$ mientras $u_i(t)$ son números binarios predeterminados de acuerdo con el cronograma de referencia. En ese caso, el consumo de energía se calcula como 5.045 kWh, y el ahorro de energía es del 37.09% en comparación con el consumo de energía del programa de referencia. El costo de consumo de energía correspondiente es \$1.14. La figura 5.17 muestra un perfil de despacho óptimo de energía en una aplicación práctica.

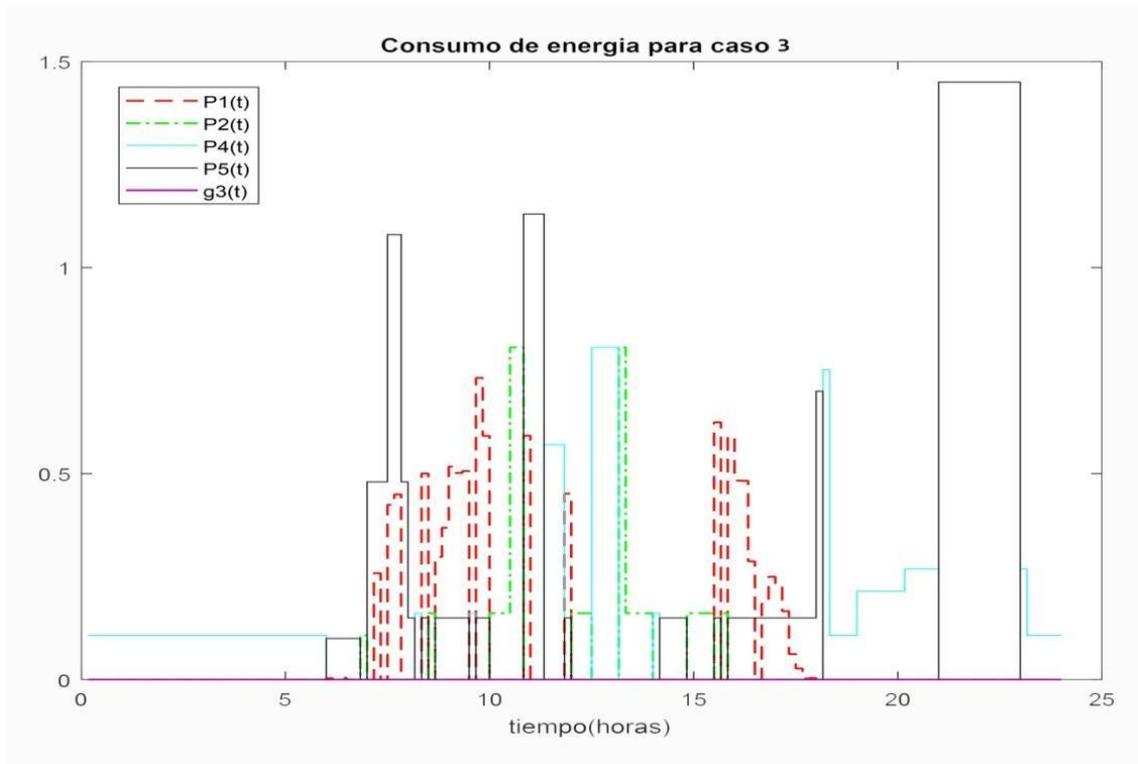


Figura 5.17 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el consumo de energía sin cambiar el patrón de consumo.

- 4) Si el residente toma en consideración los costos y no desea cambiar el horario de línea base de los electrodomésticos, la estrategia de operación óptima puede derivarse resolviendo la función objetivo $Min. f = J_c$ mientras $u_i(t)$ son números binarios predeterminados de acuerdo con el cronograma de referencia. En ese caso, el costo se calcula como \$0.65, y el ahorro de costos es 18.95% en comparación con el costo del cronograma de referencia. El consumo de energía correspondiente es de 6.62 kWh. La figura 5.18 muestra un perfil de despacho óptimo de energía en una aplicación práctica.

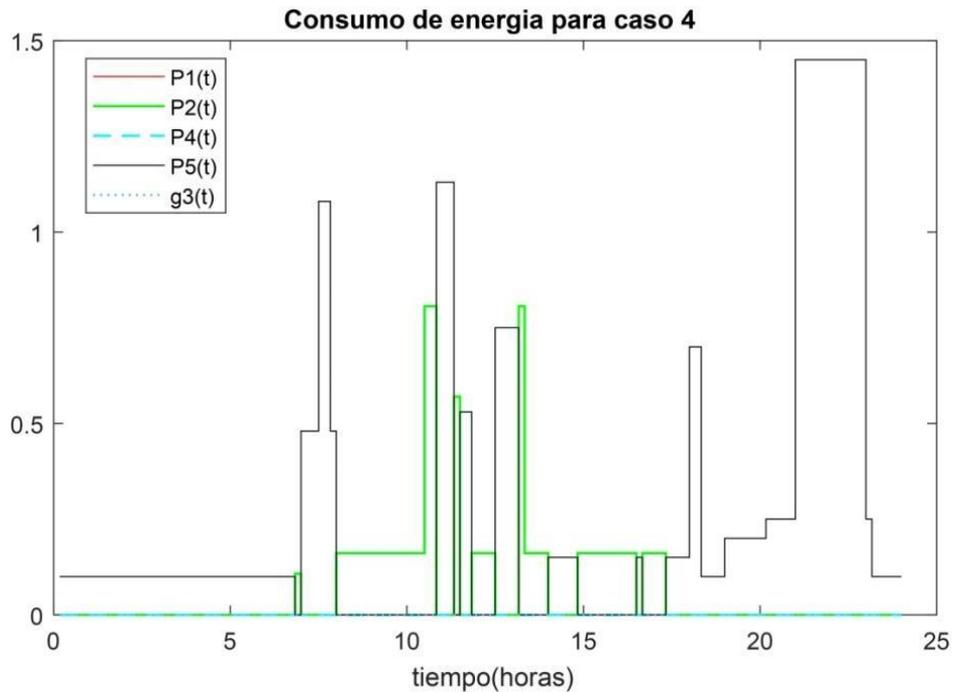


Figura 5.18 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el costo de energía sin cambiar el patrón de consumo.

- 5) Si el residente espera el costo más bajo de la energía mientras espera que su consumo de energía de la red sea inferior a 6 kWh, pero no está dispuesto a estar sujeto a un nivel de inconveniencia superior a 19 (es decir 50% de inconveniencia), la estrategia de operación óptima se puede obtener resolviendo la función objetivo $Min. f = J_C$ con dos restricciones adicionales $J_e \leq 6$ y $\beta \leq 19$. En ese caso, el costo se calcula como \$0.69, y el ahorro de costos es del 13.96% en comparación con el costo del cronograma de referencia. El consumo de energía correspondiente es de 5.99 kWh. La figura 5.19 muestra un perfil de despacho óptimo de energía en una aplicación práctica.

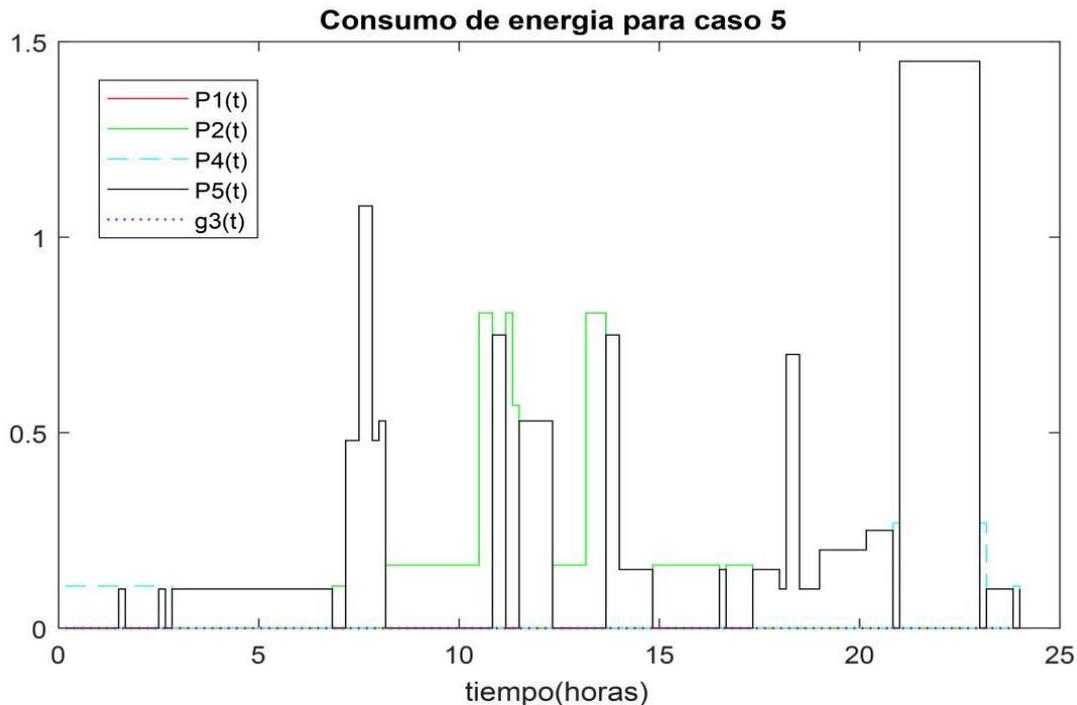


Figura 5.19 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el costo de energía con un nivel de inconveniencia $\beta \leq 19$ y consumo de energía $J_e \leq 6 kWh$.

- 6) Si el residente espera el menor consumo de energía de la red mientras espera gastar menos de \$0.6 por la energía, pero no está dispuesto a estar sujeto a un nivel de inconveniencia superior a 19 (es decir, 50% de inconveniencia), la estrategia de operación óptima puede derivarse resolviendo la función objetivo $Min.f = J_e$ con dos restricciones adicionales $J_c \leq 0.6$ y $\beta \leq 19$. En ese caso, no se pueden obtener soluciones viables. El cliente necesita aumentar el presupuesto o aumentar el nivel de inconveniencia.

Los resultados en los casos 1) y 2) muestran que el gasto de energía y el consumo de energía pueden reducirse en gran medida mediante las estrategias de control óptimas, que también denotan el potencial máximo exacto de ahorro de costes y ahorro de energía en un sistema de energía híbrido de este tipo. Los resultados de los casos 3) y 4) indican que el ahorro potencial en gasto y consumo energéticos se atenuaría un poco si no se tiene en cuenta la programación de los electrodomésticos. En el caso 4), al residente no le gustaría reprogramar los electrodomésticos en absoluto y no le preocupa la preservación del medio ambiente, solo se considera la estrategia óptima de despacho de energía para satisfacer el perfil de demanda de energía fija y ahorrar dinero, excepto que el costo de degradación del ciclo del sistema de la batería se ha considerado adicionalmente en nuestro modelo de Marlon Abel Mosquera

optimización. Para evaluar la influencia del costo de desgaste de la batería en las estrategias de administración de energía, en el caso 4), se omitió el costo de desgaste de la batería J_B y luego se volvió a realizar la simulación. El correspondiente perfil óptimo de distribución de energía se muestra en la Fig.5.20. En comparación con la Fig.5.18, $P_1(t)$ y $P_4(t)$ en la Fig.5.20 no siempre son iguales a 0, lo que significa que el sistema de la batería se utilizará si su costo de ciclo de vida es insignificante, y el costo diario más bajo correspondiente es \$0.50. Sin embargo, si se tiene en cuenta el costo de desgaste J_B , en ese caso, el costo diario realista aumentará a \$1.135, que es más alto que el costo diario más bajo \$0.65 en el caso 4). Estos resultados validan que la degradación del ciclo del sistema de la batería tiene una influencia considerable en las estrategias de administración de energía, así como en los costos operativos, que deben considerarse en el diseño y operación de dichos sistemas de energía residencial.

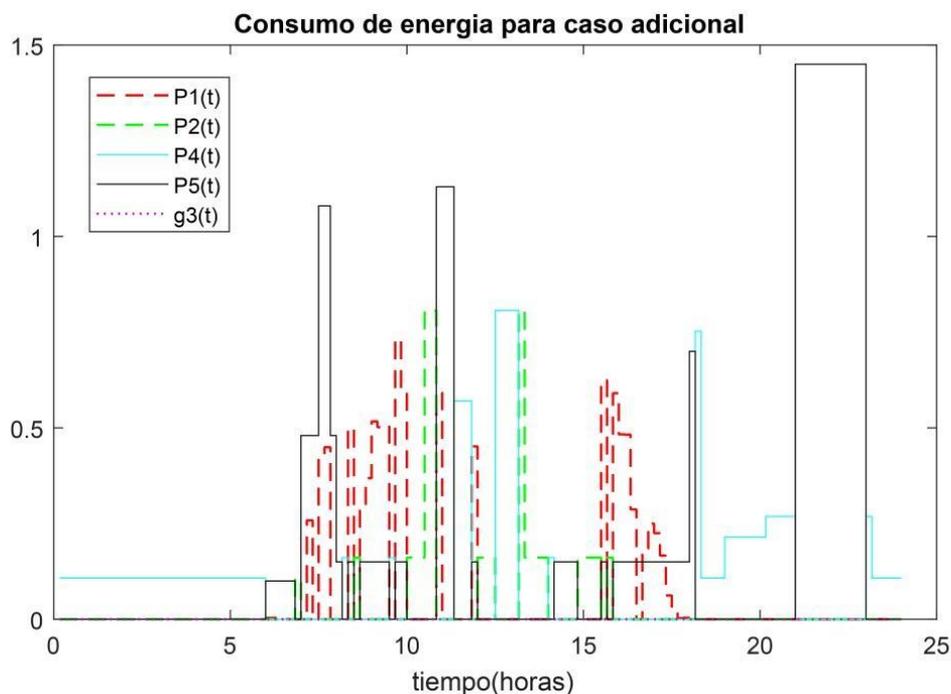


Figura 5.20 - Despacho óptimo de energía de parte de la batería, paneles solares y de la red de distribución para minimizar el consumo de energía sin cambiar el patrón de consumo y sin tomar en cuenta el costo de la batería.

Es fácil ver que, en los casos 5) y 6), el factor de inconveniencia, el ahorro de costes y el ahorro de energía se gestionan para ser considerados al mismo tiempo por el método propuesto. La compensación entre ellos podría ayudar a los residentes a tomar una decisión informada sobre cuánto están dispuestos a sufrir molestias, lo que puede afectar su comportamiento de consumo de energía. Se encuentra que, $g_3(t)$ en los casos 1) – 5) son siempre iguales a 0



(consulte la Fig.5.15, Fig.5.16, Fig.5.17, Fig.5.18, Fig.5.19). Significa que la batería nunca se carga con la energía de la red y, por lo tanto, el cargador de AC es redundante en estas condiciones. También se encuentra que, $g_3(t)$, $P_1(t)$ y $P_4(t)$ en los casos 2), 4) y 5) son siempre iguales a 0 (consulte la Fig.5.16, Fig.5.18, Fig.5.19), y por lo tanto, la batería sería redundante para el sistema de energía híbrido si los residentes buscan minimizar su costo operativo. Esto se debe al alto costo de desgaste del uso del sistema de la batería. Por lo tanto, el método propuesto puede ayudar a los clientes a simplificar el sistema de energía híbrida, así como a disminuir su capital inicial al omitir algunos componentes redundantes (por ejemplo, un cargador de AC o de batería) bajo ciertas condiciones. Relativamente, $P_1(t)$ y $P_4(t)$ en la Fig.5.15, Fig.5.16 no siempre son iguales a 0, muestra que el sistema de la batería juega un papel importante al almacenar la energía del sistema de paneles solares y descargarla a los electrodomésticos cuando los residentes buscan minimizar el consumo de energía de la red para reducir las emisiones de combustibles fósiles.



Capítulo 6

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

En un hogar típico de Cuenca se puede gestionar la energía eléctrica mediante un sistema híbrido de batería / sistema fotovoltaico que favorece al cliente al minimizar tanto el consumo como el costo de energía. En cuanto al consumo de energía en el hogar, este se ve disminuido según lo analizado en las simulaciones de la sección 5.6. En este caso, el almacenamiento de la energía juega un papel fundamental, ya que, se puede almacenar la energía obtenida de los paneles solares y suministrar la energía en horas convenientes, de acuerdo con el patrón de consumo. De la misma manera, el costo de la energía pudo disminuirse sin necesidad de la participación de las medidas del mercado (TOU). Aunque el precio de la energía eléctrica sea el mismo en Ecuador, se puede disminuir el costo de la energía por día y consecuentemente se crea un incentivo para el cliente al disminuir el costo mensual de la energía.

Incorporar los conceptos DSM en el hogar fue un tema indirecto de la gestión del sistema híbrido. Prácticamente al programar los electrodomésticos buscando minimizar el costo de energía eléctrica, se aplicó las estrategias de modalidad SELM. Al alterar el patrón de consumo se pudo ahorrar energía consumida de la red y al mismo tiempo conseguir un estímulo económico. Esto se puede ver reflejado en los casos 2) y 5) de la figura 5.16 y 5.19 respectivamente. Desde este punto de vista, el caso más relevante que aplica los conceptos DSM sería el caso 5) ya que logra casi el mismo costo y el menor consumo de energía comparándolo con el caso 2).

El sistema híbrido pudo ser modelado mediante un método de conmutación simple. En la figura 3.2 se estableció el diseño del sistema híbrido, mediante este método. A comparación de otros sistemas híbridos, de acuerdo con lo mencionado en el capítulo 2, tanto la topología utilizada como la técnica de optimización resulta ser menos robusta y más completa respectivamente. Es menos robusta debido a que en el diseño del sistema no se utilizan elementos sofisticados como controladores de flujo de corriente o dispositivos inteligentes para el despacho y suministro de energía. Más bien, se utilizó en el modelo interruptores que permiten administrar la energía de una forma sencilla y eficaz. Gracias a este método se pudo programar los electrodomésticos, pudiendo así mejorar la gestión de la energía en el sistema. La técnica de optimización de



programación no lineal utilizada resulta ser una de las más completas, ya que incorpora estrategias de gestión técnica, económicas y además factores sociales como el nivel de inconvenientes de la programación de electrodomésticos.

La ventaja de utilizar la técnica de PNLEM es que permite tomar en cuenta el nivel de inconvenientes del usuario, el costo de energía y también el consumo de energía. De acuerdo con las simulaciones de la sección 5.6, se puede apreciar que no es posible conseguir una optimización total de estas tres categorías al mismo tiempo, ya que la una va afectada por la otra. Si deseamos disminuir el consumo de energía, el costo aumenta debido a que es indispensable utilizar el banco de batería para ese propósito. De la misma manera, si deseamos minimizar el costo de la energía el nivel de inconvenientes del usuario se ve afectado. Por lo tanto, la optimización del sistema híbrido de un hogar puede configurarse de acuerdo con los requerimientos del usuario y presentar la flexibilidad de utilizarla en los cinco escenarios mencionados en la sección 5.6. Evidentemente los casos más ventajosos para el usuario van a ser los que menor nivel de inconveniencia tengan y mayor incentivo económico se consiga.

6.2. Recomendaciones

Tomar en cuenta el costo de almacenar la energía eléctrica resulta en que, al optimizar el costo del sistema, la mejor decisión sea obviar el uso del banco de baterías. Por lo que almacenar la energía mediante banco de baterías en un sistema híbrido es provechoso cuando el costo sea insignificante. Mientras se busca optimizar el consumo de energía, el uso de la batería es fundamental, pero desde el punto de vista del costo resulta poco provechoso.

Se observa que, el perfil de generación de energía del sistema fotovoltaico son los datos de entrada del modelo y, por lo tanto, no tienen influencia en el modelo propuesto en sí, aunque podría afectar el ahorro potencial máximo en el gasto de energía y el consumo de energía para diferentes configuraciones del sistema híbrido de paneles solares/sistema de batería. Y, si se necesita la simulación anual, los datos de producción de energía de los paneles solares en todos los días del año deben usarse para calcular la solución óptima día a día, y el sistema de gestión propuesto proporcionará la estrategia operativa óptima de cada día del año por separado.



Es importante enfatizar que dado que todos los tipos de electrodomésticos pueden ser cubiertos por las tres categorías (es decir, cargas fijas, cargas móviles y cargas flexibles), y sus patrones operativos se consideran completamente en este estudio. El método de gestión del sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico en el hogar conectado a la red propuesto en este trabajo de titulación puede ser fácilmente replicable en un hogar de cualquier parte del Ecuador y del mundo, y seguir teniendo efecto.

Un tema que queda por desarrollar para futuros estudios es el dimensionamiento óptimo de un sistema híbrido baterías/sistema fotovoltaico en el hogar. Esta tesis se centró en la gestión óptima de la energía del sistema híbrido con un dimensionamiento del sistema que consiga una autonomía parcial en el hogar. El dimensionamiento del sistema híbrido para este ejemplo se lo hizo de acuerdo al kit de expertos en el tema, de la empresa AutoSolar.

Hasta este punto, el estudio permite analizar un sistema híbrido a pequeña escala para tomar decisiones de planificación, tener criterios adecuados para el funcionamiento óptimo del mismo y saber en qué momentos es conveniente usar banco de baterías. El diseño del dispositivo de la UGE puede ser practicable en un hogar, aunque el patrón de consumo no sea el mismo para cada día de la semana, debido al comportamiento incierto del usuario. Valdría la pena mejorar en la flexibilidad de la programación del sistema de control del dispositivo para que se pueda tomar decisiones óptimas pero al mismo tiempo adaptadas al comportamiento del usuario.



Bibliografía

- [1] H. T. X. X. Zhou Wu, "Demand side management of photovoltaic-battery hybrid system," *Applied Energy*, pp. 294 - 304, 2015.
- [2] X. X. Zhou Wu, "Optimal switching renewable energy system for demand side management," *Solar Energy*, pp. 278 - 288, 2015.
- [3] X. H. Q. W. e. a. Zhaoguang Hu, *Integrated Resource Strategic Planning and Power Demand - Side Management*, New York Dordrecht London: Springer Heidelberg, 2013.
- [4] M. D. A. Fattahi Meyabadi, "A review of demand-side management: Reconsidering theoretical framework," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 367 - 379, 2017.
- [5] C.W.Gellings, «The concept of demand-side management for electric utilities,» *Proc IEEE*, 1985, pp. 1468-1470.
- [6] C.W.Gellings, «IEEE PES load management working group,» *Power Eng Rev IEEE*, pp. 7-8, 1981.
- [7] A. E. Almeida, «GUÍA PRÁCTICA PARA EL USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ECUADOR,» *MEER*.
- [8] MEER, «Plan Nacional de Eficiencia Energética,» pp. 26 - 31, 2016.
- [9] W. L. K. W. C. Y. C. Y. K. X. L. X. W. Bin Zhou, "Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 30 - 40, 2016.
- [10] ARCONEL, «PLIEGO TARIFARIO PARA LAS EMPRESAS ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN CODIFICADO,» 2019.
- [11] M. C.-C. A. G. F. M.-H. E. C.-M. D. M. J. J.-L. E. Matallanas, «Neural network controller for Active Demand-Side Management ith PV energy in the residential sector,» *Applied Energy*, vol. 91, nº 1, pp. 90-97, 2012.
- [12] A. B. M. U. A. Tascikaraoglu, «A demand side management strategy based on forecasting of residential renewable sources: A smart home system in Turkey,» *Energy and Building*, vol. 80, nº 1, pp. 309-320, 2014.
- [13] M. B. V. G. L. M. P. E. Anastasia Roth, «A flexible metamodel architecture for optimal design of Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) – Case



- study of a stand-alone HRES for a factory in tropical island,» *Cleaner Production*, pp. 214 - 225, 2018.
- [14] Y. Z. C. M. Y. Y. E. C. Jijian Lian, "A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems," *Energy Conversion and Management*, p. Volumen 199, 2019.
- [15] ARCONEL, Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano, 2018.
- [16] G. G. G. K. N. D. Pero Prebeg, «Long-term energy planning of Croatian power system using multi-objective optimization with focus on renewable energy and integration of electric vehicles,» *Applied Energy*, vol. 184, nº 1494, pp. 1493 - 1507, 2016.
- [17] B. A. F. G. B. A. T. Z. S. S. M. G. M. Z. J. Sarah Becker, «Features of a fully renewable US electricity system: Optimized mixes of wind and solar PV and transmission grid extensions,» *Energy*, pp. 443-458, 2014.
- [18] B. N. A. B. Y. Y. N. S. M. R. Charafeddine Mokhtara, «Integrated supply–demand energy management for optimal design of off-grid hybrid renewable energy systems for residential electrification in arid climates,» *Energy Conversion and Management*, p. Volumen 221, 2020.
- [19] A. D. I. H. F. S. J. FJ Vivas, «A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , pp. 126 - 155 volumen 82, 2018.
- [20] Z. M. Mohammad Jafari, «Optimal energy management of a residential-based hybrid renewable energy system using rule-based real-time control and 2D dynamic programming optimization method,» *Renewable Energy*, pp. 254-266 - Volumen 146, 2020.
- [21] B. S. Hari Charan Cherukuri, «Hybrid energy management strategy for residential consumers using virtual and actual storage systems,» *Journal of Energy Storage*, p. Volumen 25, 2019.
- [22] H. T. Hadi Taghavifar, «Adaptive robust control-based energy management of hybrid PV-Battery systems with improved transient performance,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020.
- [23] F. Y. Xiaohua Xia, "Techno-economic and environmental optimization of a household photovoltaic-battery hybrid power system within demand side management," *Renewable Energy*, pp. 132 - 143, 2017.



- [24] E. D. F. W. J. Y. Masoume Shabani, «Techno-economic comparison of optimal design of renewable-battery storage and renewable micro pumped hydro storage power supply systems: A case study in Sweden,» *Applied Energy*, p. volumen 279, 2020.
- [25] AutoSolar, «AGM DEEP CYCLE BATTERY 12V 300 AH,» [En línea]. Available: <https://autosolar.es/pdf/datasheet-tensite-batteries-AGM-12-300.pdf>. [Último acceso: 6 Noviembre 2020].
- [26] GNB, «BAE Secura PVV Solar,» [En línea]. Available: https://autosolar.es/pdf/bae_secura_solar_gel.pdf. [Último acceso: 17 02 2021].
- [27] Trojan, «Guía de especificaciones de producto, Una guía completa de selección de baterías,» [En línea]. Available: <https://autosolar.es/pdf/TROJAN-GENERAL.pdf>. [Último acceso: 17 02 2021].
- [28] Upower - SPO, «Solar Power Abiertas,» [En línea]. Available: <https://autosolar.es/pdf/Upower-SPO.pdf>. [Último acceso: 17 02 2021].
- [29] TAB TOPzS, «Baterias estacionarias TAB TOPPZS de bajo mantenimiento,» [En línea]. Available: <https://autosolar.es/pdf/Bateria-TAB-solar-T-OPZS.pdf>. [Último acceso: 17 02 2021].
- [30] L. W. Xunyan Jiang, «A Residential Load Scheduling Based on Cost Efficiency and Consumer's Preference for Demand Response in Smart Grid,» *Electric Power System Research*, p. Volumen 186, 2020.
- [31] R. Anurag Chauhan, «A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 99 - 120 Volumen 38, 2014.
- [32] S. M. M. I. M. M. Lanre Olatomiwa, «Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 821 - 835 Volumen 62, 2016.
- [33] S. S. Rao, *Engineering Optimization Theory and Practice*, Coral Gables, Florida: John Wiley & Sons, 2009.
- [34] M. S. K. S. Swati Sharda, «Demand side management through load shifting in IoT based HEMS: Overview, challenges and opportunities,» *Sustainable Cities and Society*, p. Volumen 65, 2021.



- [35] J. C. Spall, Introduction to stochastic search and optimization, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- [36] Í. Y. D. d. H. Bram L. Gorissen, «A practical guide to robust optimization,» *Omega*, pp. 124 - 137 Volumen 53, 2015.
- [37] M. N. M. B. R. D. M. S. A. K. N. A. Z. I. Nadeem Javaid, «A new heuristically optimized Home Energy Management controller for smart grid,» *Sustainable Cities and Society*, pp. 211 - 227 Volumen 34, 2017.
- [38] V. D. Prabodh Bajpai, «Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 2926 - 2939 Volumen 16, 2012.
- [39] B. Z. X. Henerica Tazvinga, «Optimal power flow management for distributed energy resources with batteries,» *Energy Conversion and Management*, pp. 104 - 110, 2015.
- [40] L. Z. J. Z. Joey Jung, lead - acid battery technologies, Boca Ratón: Taylor & Francis Group, 2016.
- [41] X. X. Sam M. Sichilalu, «Optimal energy control of grid tied PV–diesel–battery hybrid system powering heat pump water heater,» *Solar Energy*, pp. 243 - 254 - Volumen 115, 2015.
- [42] F. G. Benítez, «Manual de Balances Energía Util,» Copyright © OLADE 2017, Quito - Ecuador, 2017.
- [43] CENTROSUR, «Instructivo Aprobación de Diseños,» Cuenca.
- [44] AutoSolar, PANEL SOLAR 200W 72 CÉLULAS. [En línea].: <https://autosolar.es/pdf/ficha-tecnica-panel-200w-12v.pdf>. [Último acceso: 6 Noviembre 2020].
- [45] D. S. Xiaohua Xia, «Combined residential demand side management strategies with coordination and economic analysis,» *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 150-160, 2016.
- [46] Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, «Balance Energético Nacional 2016,» p. 88, 2016.
- [47] Asambela Nacional de Ecuador, «Informe para Primer Debate del Proyecto de Ley de Eficiencia Energética,» Quito, 2018.
- [48] F. G. Benitez, «Organización Latinoamericana de Energía (OLADE),» Copyright, Quito - Ecuador, 2017.



- [49] X. X. Ditiro Setlhaolo, «Optimal scheduling of household appliances with a battery storage system and coordination,» *Energy and Buildings*, p. 10, 2015.
- [50] AutoSolar, «Must Solar 1000W - 12V - PWM 50A,» [En línea]. Available: <https://autosolar.es/pdf/FICHA-INVERSOR-MUST-1000W-PWM.pdf>. [Último acceso: 6 Noviembre 2020].
- [51] <https://www.inverseproblem.co.nz/OPTI/index.php/Probs/MINLP>, «OPTI Toolbox,» *MINLP*.
- [52] GNB, «Industrial Power,» [En línea]. Available: ww.gnb.com. [Último acceso: 19 02 2021].