



**Diseño y simulación de un sistema de generación y almacenamiento híbrido para el  
abastecimiento de energía a una comunidad aislada del Ecuador**

Acosta Carua, Jonathan Daniel

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero en Electrónica,  
Automatización y Control

Ing. Arcos Avilés, Diego Gustavo, Ph. D.

01 de febrero de 2022



Tesis\_Acosta\_sim.pdf

Scanned on: 21:57 February 1, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	576
Words with Minor Changes	153
Paraphrased Words	314
Ommited Words	0



Firmado electrónicamente por:  
**DIEGO GUSTAVO  
ARCOS AVILES**



Website | Education | Businesses



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño y simulación de un sistema de generación y almacenamiento híbrido para el abastecimiento de energía a una comunidad aislada del Ecuador**” fue realizado por el señor Acosta Carua, Jonathan Daniel el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 03 de febrero de 2022

Firma:



Firmado electrónicamente por:  
**DIEGO GUSTAVO  
ARCOS AVILES**

---

**Diego Gustavo Arcos Avilés, Ph. D.**

C.C.: 171087944-4



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Acosta Carua, Jonathan Daniel**, con cédula de ciudadanía n° 172553992-6, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y simulación de un sistema de generación y almacenamiento híbrido para el abastecimiento de energía a una comunidad aislada del Ecuador”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 01 de febrero de 2022**

Firma:

**Acosta Carua, Jonathan Daniel**

C.C.: 172553992-6



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo **Acosta Carua, Jonathan Daniel**, con cédula de ciudadanía n° 172553992-6, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño y simulación de un sistema de generación y almacenamiento híbrido para el abastecimiento de energía a una comunidad aislada del Ecuador”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 01 de febrero de 2022**

Firma:

---

**Acosta Carua, Jonathan Daniel**

C.C.: 172553992-6

## Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres, Luis y Norma, quienes siempre me brindaron su apoyo incondicional ya sea económico como emocionalmente durante este periodo de mi vida, y me inculcaron su voluntad hacia el trabajo honesto, el esfuerzo y la tenacidad por cumplir los objetivos que me proponga.

A mis hermanas, Gaby y Pamela, por brindarme su mano no solo como familia sino también como amigas en los momentos que más lo necesitaba. Reímos, lloramos, peleamos, pero siempre estamos juntos.

A mis mascotas, Bocky (QEPD) y Hachi, por darme su amistad incondicional a lo largo de los años, y su compañía mientras trabaja por cumplir este objetivo en mi vida, aunque se vayan primero sé que siempre me acompañarán.

Jonathan Daniel Acosta Carua

## Agradecimientos

Quiero agradecer a toda mi familia quienes directa o indirectamente me brindaron su apoyo a lo largo de mi vida y que junto con sus enseñanzas, experiencia y valores hicieron posible que este aquí hoy en día.

A Emilio (QEPD), mi tío, quien siempre ha sido una fuente de inspiración y el vivo ejemplo de que el esfuerzo, la creatividad, la motivación y el humor hacen de alguien una persona extraordinaria.

A los docentes y profesionales que forman parte del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por haber dedicado tiempo y esfuerzo en la formación profesional de mí y de muchos otros estudiantes.

A mi tutor, Diego Arcos Avilés, Ph.D., por su conocimiento, ayuda y consejos en la elaboración de este trabajo, y por darme la oportunidad de trabajar cara a cara con miembros de la comunidad científica dentro de un proyecto y brindarme la motivación necesaria para alcanzar objetivos cada vez mayores.

A mis amigos de toda la vida y a los que llegué a conocer en la universidad, con los que compartí muchas experiencias en el largo y arduo camino por llegar a ser profesionales y que hicieron que esta etapa de mi vida llegara a ser entre muchas otras cosas, inolvidable.

A todos los que mencione y los que no alcance a mencionar, gracias.

## Índice de Contenidos

Análisis Urkund .....	2
Certificación del Tutor .....	3
Autorización de Publicación .....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimientos .....	7
Índice de Contenidos .....	8
Índice de Tablas.....	12
Índice de Figuras .....	14
Resumen.....	17
Abstract .....	18
Capítulo I. Introducción.....	19
Antecedentes .....	19
Justificación e Importancia.....	24
Alcance del Proyecto .....	27
Objetivos.....	29
<i>Objetivo general</i> .....	29
<i>Objetivos específicos</i> .....	29
Descripción del Proyecto .....	30
Capítulo II. Modelos Matemáticos del Sistema de Generación y Almacenamiento.....	33
Sistema de Generación.....	33

	9
<i>Generador a diésel</i> .....	33
<i>Panel fotovoltaico</i> .....	38
Sistema de Almacenamiento .....	43
<i>Almacenador térmico</i> .....	43
<i>Almacenador eléctrico</i> .....	49
Capítulo III. Generación de Perfil de Consumo y Obtención de Datos Meteorológicos .	56
Perfil de Consumo de Potencia para una Comunidad Aislada del Ecuador .....	56
<i>Determinación de aparatos que consumen energía eléctrica</i> .....	59
<i>Simulación de consumo para una residencia</i> .....	61
<i>Generación del perfil de consumo</i> .....	62
Datos Meteorológicos de la Zona .....	64
<i>Irradiación solar</i> .....	65
<i>Temperatura ambiente</i> .....	66
Capítulo IV. Diseño de Algoritmos y Estrategias de Gestión de Energía.....	69
Diseño del Algoritmo para la Determinación de Velocidad de Giro Óptima del Generador a Diésel.....	69
<i>Consumo de combustible y emisiones de CO2</i> .....	73
<i>Controlador</i> .....	75
Diseño de Estrategia de Gestión de Energía Basada en Control Heurístico .....	78
<i>Almacenador eléctrico</i> .....	78
<i>Almacenamiento térmico</i> .....	81

Diseño de Estrategia de Gestión de Energía Basada en el Control por Lógica Difusa (FLC) .....	82
<i>Control basado en lógica difusa (FLC)</i> .....	82
<i>Diagrama de bloques de control</i> .....	83
<i>Diseño del controlador fuzzy</i> .....	87
Capítulo V. Simulación de Casos de Estudio.....	93
Comparación Configuraciones del Sistema de Generación Híbrido .....	93
<i>Caso 1: Sistema solo con generador diésel</i> .....	94
Implementación en Simulink.....	95
Resumen de parámetros de modelos y controladores. ....	95
Resultados .....	97
<i>Caso 2: Sistema con generador diésel, panel fotovoltaico y sistema de almacenamiento térmico y eléctrico</i> .....	100
Implementación en Simulink.....	102
Resumen de parámetros de modelos y controladores .....	103
Resultados .....	106
<i>Análisis de resultados</i> .....	112
Comparación de Estrategias de Gestión de Energía para el Almacenador Eléctrico	115
<i>Caso 1: Utilización de estrategia basada en control heurístico (HC)</i> .....	116
Resultados .....	116
<i>Caso 2: Utilización de estrategia basada en FLC</i> .....	120
Implementación en Simulink.....	121

Resumen de parámetros de modelos y controladores .....	122
Resultados .....	124
<i>Análisis de resultados</i> .....	133
Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones .....	141
Conclusiones.....	141
Recomendaciones .....	144
Reconocimientos.....	145
Bibliografía .....	145
Anexos .....	150

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Valores típicos de los parámetros para el modelo del motor diésel .....	37
<b>Tabla 2.</b> Tipos de almacenamiento térmico .....	44
<b>Tabla 3.</b> Características de las baterías de ion-litio y plomo ácido .....	51
<b>Tabla 4.</b> Cargas propuestas para la vivienda .....	60
<b>Tabla 5.</b> Consumo semanal para una vivienda en una comunidad aislada .....	61
<b>Tabla 6.</b> Datos de consumo por mes .....	64
<b>Tabla 7.</b> Datos de irradiación solar de los meses de 2020 .....	66
<b>Tabla 8.</b> Datos de temperatura de los meses de 2020 .....	67
<b>Tabla 9.</b> Factores de emisión de CO <sub>2</sub> .....	74
<b>Tabla 10.</b> Parámetros de desempeño de controladores .....	77
<b>Tabla 11.</b> Base de reglas para el control difuso .....	91
<b>Tabla 12.</b> Características del motor a diésel acoplado al generador .....	95
<b>Tabla 13.</b> Parámetros del modelo matemático que definen el comportamiento del generador diésel .....	96
<b>Tabla 14.</b> Ganancias del controlador PID Tipo C de velocidad .....	96
<b>Tabla 15.</b> Parámetros utilizados en el algoritmo de cálculo de velocidad optima (Caso 1) .....	96
<b>Tabla 16.</b> Características del motor a diésel acoplado al generador .....	103
<b>Tabla 17.</b> Parámetros utilizados en el algoritmo de cálculo de velocidad optima (Caso 2) .....	103
<b>Tabla 18.</b> Parámetros del sistema de generación fotovoltaico .....	104
<b>Tabla 19.</b> Parámetros del modelo matemático del almacenador térmico .....	105
<b>Tabla 20.</b> Parámetros del modelo matemático para la estimación del SOC .....	105
<b>Tabla 21.</b> Parámetros utilizados en el EMS basado en control heurístico .....	105
<b>Tabla 22.</b> Resultados para un año de dos casos de estudio .....	113

<b>Tabla 23.</b> Característica del motor a diésel acoplado al generador.....	122
<b>Tabla 24.</b> Parámetros utilizados en el algoritmo de cálculo de velocidad optima (Caso 2) .....	123
<b>Tabla 25.</b> Parámetros utilizados en el EMS basado en control difuso.....	123
<b>Tabla 26.</b> Resultados para un año de dos casos de estudio .....	133

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Arquitectura completa del sistema de generación y almacenamiento híbrido	31
<b>Figura 2.</b> Diagrama de bloques del motor diésel .....	38
<b>Figura 3.</b> Circuito equivalente de una celda solar .....	38
<b>Figura 4.</b> Curva voltaje - corriente y voltaje - potencia de una celda solar.....	41
<b>Figura 5.</b> Esquema del almacenador térmico.....	46
<b>Figura 6.</b> Gráfico para determinar el diámetro del tanque en función del volumen y el coeficiente F.....	48
<b>Figura 7.</b> Elementos de una batería .....	50
<b>Figura 8.</b> Reacción química de una batería de ion litio .....	53
<b>Figura 9.</b> Modelo eléctrico de una batería.....	54
<b>Figura 10.</b> Ubicación geográfica de Santa Elena en Ecuador .....	56
<b>Figura 11.</b> Infraestructura eléctrica de CNEL EP Unidad de Negocio Santa Elena.....	58
<b>Figura 12.</b> Ubicación geográfica de la parroquia Río Verde .....	59
<b>Figura 13.</b> Consumo semanal propuesto para una vivienda .....	62
<b>Figura 14.</b> Perfil de consumo anual.....	63
<b>Figura 15.</b> Irradiación solar Río Verde año 2020 .....	65
<b>Figura 16.</b> Temperatura ambiente Río Verde año 2020 .....	67
<b>Figura 17.</b> Diagrama de flujo para el cálculo de la velocidad optima y consumo del motor .....	71
<b>Figura 18.</b> Interfaz PID Tuner de Matlab .....	76
<b>Figura 19.</b> Comparación controladores .....	76
<b>Figura 20.</b> Estructura básica de un control FLC.....	83
<b>Figura 21.</b> Diagrama de bloques de la estrategia para el EMS basado en control Fuzzy .....	84
<b>Figura 22.</b> Funciones de membresía para las variables de entrada.....	88

<b>Figura 23.</b> Funciones de membresía para la salida del controlador.....	90
<b>Figura 24.</b> Arquitectura del sistema de generación y almacenamiento híbrido.....	94
<b>Figura 25.</b> Modelo del sistema de generación solo con un generador a diésel .....	95
<b>Figura 26.</b> Potencia generada por el generador a diésel (Caso 1).....	98
<b>Figura 27.</b> Velocidad del motor a diésel acoplado al generador (Caso 1).....	98
<b>Figura 28.</b> Consumo del generador en galones de diésel (Caso 1) .....	99
<b>Figura 29.</b> Potencia residual producto de la operación del generador a diésel .....	100
<b>Figura 30.</b> Modelo del sistema de generación y almacenamiento híbrido (Parte 1) ....	102
<b>Figura 31.</b> Modelo del sistema de generación y almacenamiento híbrido (Parte 2) ....	102
<b>Figura 32.</b> Potencia generada por el generador a diésel (Caso 2).....	107
<b>Figura 33.</b> Velocidad del motor a diésel acoplado al generador (Caso 2).....	107
<b>Figura 34.</b> Potencia de generación fotovoltaica .....	108
<b>Figura 35.</b> Consumo del generador en galones de diésel (Caso 2) .....	109
<b>Figura 36.</b> Potencia y SOC del almacenador eléctrico (Caso 2) .....	110
<b>Figura 37.</b> Potencia y temperatura al interior del tanque de agua (Caso 2).....	111
<b>Figura 38.</b> Comparación entre la potencia residual antes y después de su uso en el sistema de almacenamiento.....	112
<b>Figura 39.</b> Comportamiento del sistema con EMS basado en control heurístico bajo condiciones de irradiación solar .....	117
<b>Figura 40.</b> Balance de potencia del sistema basado en control heurístico .....	120
<b>Figura 41.</b> Estrategia de control basada en lógica difusa (FLC).....	121
<b>Figura 42.</b> Modelo del sistema para la estrategia basada en lógica difusa.....	122
<b>Figura 43.</b> Potencia generada por el generador a diésel (EMS FLC) .....	125
<b>Figura 44.</b> Velocidad del motor a diésel acoplado al generador (EMS FLC) .....	125
<b>Figura 45.</b> Potencia y SOC del almacenador eléctrico (EMS FLC) .....	127
<b>Figura 46.</b> Potencia y temperatura al interior del tanque de agua (EMS FLC) .....	128

<b>Figura 47.</b> Comparación entre la potencia residual antes y después de su uso en el sistema de almacenamiento (EMS FLC).....	129
<b>Figura 48.</b> Comportamiento del sistema con EMS basado en FLC bajo condiciones de irradiación solar.....	130
<b>Figura 49.</b> Balance de potencia del sistema basado en FLC .....	133
<b>Figura 50.</b> Comparación de los perfiles de potencia del generador a diésel elaborados con las dos estrategias de control.....	136
<b>Figura 51.</b> Comparación del estado de carga de la batería, obtenido como resultado del uso de las dos estrategias de control.....	138
<b>Figura 52.</b> Evolución en el comportamiento del sistema con EMS basado en control heurístico y basado en FLC.....	139

## Resumen

La demanda de energía a nivel mundial ha aumentado en los últimos años al igual que lo ha hecho la población, esto da como resultado la necesidad de un suministro de energía confiable y constante en todo el territorio de una nación. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos de los gobiernos por cumplir con este objetivo existen en la actualidad comunidades que no tienen acceso al servicio eléctrico. Ante esta situación muchas de estas localidades optan por el uso de generadores a diésel para abastecerse de electricidad. Diversos estudios realizados concluyen que el uso de sistemas de generación híbridos son la opción más viable y eficaz en estos escenarios, por esa razón en el presente trabajo se propone el diseño de un sistema de generación y almacenamiento híbrido para el suministro de potencia a una comunidad aislada del Ecuador, el sistema está compuesto de un generador a diésel, un generador fotovoltaico y un sistema de almacenamiento eléctrico y térmico, bajo el control de un Sistema de Gestión de Energía (EMS). Los resultados son obtenidos mediante simulaciones realizadas en Matlab/Simulink. Se plantean tres casos de estudio que permiten comparar el desempeño del uso del sistema propuesto con énfasis en el consumo de combustible, emisiones de CO<sub>2</sub> y potencia desperdiciada, así como observar su comportamiento al utilizar dos diferentes estrategias de control.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **SISTEMA DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO HÍBRIDO**
- **SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA**
- **COMUNIDAD AISLADA**
- **CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES**
- **POTENCIA DESPERDICIADA**

### **Abstract**

The demand for energy worldwide has increased in recent years as has the population, this results in the need for a reliable and constant energy supply throughout the territory of a nation. However, despite government efforts to meet this goal, there are currently communities that do not have access to electricity. Given this situation, many of these towns opt for the use of diesel generators to supply themselves with electricity. Several studies carried out conclude that the use of hybrid generation systems are the most viable and effective option in these scenarios, for that reason in the present work the design of a hybrid generation and storage system for the supply of power to a community is proposed. isolated from Ecuador, the system is composed of a diesel generator, a photovoltaic generator and an electrical and thermal storage system, under the control of an Energy Management System (EMS). The results are obtained through simulations carried out in Matlab/Simulink. Three case studies are proposed that allow comparing the performance of the use of the proposed system with emphasis on fuel consumption, CO<sub>2</sub> emissions and wasted power, as well as observing its behavior when using two different control strategies.

### **KEY WORDS:**

- **HYBRID GENERATION AND STORAGE SYSTEM**
- **ENERGY MANAGEMENT SYSTEM**
- **ISOLATED COMMUNITY**
- **FUEL CONSUMPTION AND EMISSIONS**
- **WASTED POWER**

## Capítulo I. Introducción

### Antecedentes

Con el paso del tiempo el uso de energías renovables se ha convertido en un recurso cada vez más solicitado por parte de los gobiernos de los países, debido a la creciente necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes producto de la generación eléctrica, las cuales representan un foco de contaminación ambiental al utilizar combustibles fósiles como fuente de generación. De forma general se observa que las principales fuentes de energía a nivel mundial desde el desarrollo de la sociedad industrializada, la tecnología y la sociedad de consumo han sido: el petróleo, el gas natural y el carbón (Ziritt, López, & Novillo, 2012), cuya utilización siempre ha estado presente y que hasta el año 2015 constituían el 65.236% de la producción de electricidad total (Agencia Internacional de la Energía (AIE), 2021). Sin embargo, el consumo de estos recursos se ha visto disminuido debido a la inclusión de fuentes de energía alternativa, en donde se puede mencionar la energía nuclear o las fuentes de energía renovables, estas últimas prometen otorgar energía limpia a través del uso de fuentes naturales como el sol, viento, tierra y plantas (Bull, 2001). Son precisamente los constantes avances en la ciencia y la ingeniería lo que ha llevado a un desarrollo apreciable de las tecnologías relacionadas con las energías renovables de modo que en los últimos años se han vuelto más eficientes y accesibles.

Aun a pesar del uso a nivel mundial de recursos tanto renovables como no renovables destinados a su utilización para la generación de energía eléctrica, se observa que hasta el año 2019 el 9.916% de la población no cuenta con acceso a la electricidad (Agencia Internacional de la Energía (AIE), 2021). Esto se constituye en un problema general al presentar una clara deficiencia en abastecer de este servicio fundamental a las personas y comunidades. Es por ello que en la actualidad existen

zonas residenciales aisladas donde no se tiene acceso a un sistema eléctrico interconectado, por estar ubicadas en lugares sumamente remotos o que presentan grandes dificultades para acceder al servicio eléctrico. Todos estos factores han hecho que estas regiones dependan en gran medida de combustibles fósiles para la generación de energía, donde se utilizan principalmente generadores basados en motores de combustibles fósiles, generadores a diésel en específico, debido a su facilidad de diseño y construcción. Sin embargo, el combustible utilizado disminuye constantemente con los años y genera daños ambientales producto de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) (Bin, Shaidul, & Adbus, 2019), (Zaim, Soediby, & Ashari, 2019).

Una primera aproximación a la solución de este problema es la inclusión de energías renovables que trabajen en conjunto con el generador de combustible fósil para abastecer de energía eléctrica a una determinada población. Sin embargo, los generadores renovables dependen de la localización geográfica y las condiciones ambientales que no son constantes y son difícilmente predecibles, por lo que la potencia generada por estos sistemas presenta las mismas características. Esto hace que su uso sea incluso menos eficiente que el de un generador convencional, razón por la cual en la mayoría de los casos donde se utilizan energías renovables también se realiza la inclusión de un sistema de almacenamiento que sirva soporte y le brinde estabilidad al sistema de generación. A partir de una revisión realizada en (Liu, Yu, Zhu, Wang, & Liu, 2018) sobre la identificación, clasificación y análisis del desempeño de diferentes metodologías, modelo y sistemas de energías que son utilizados en islas y pueblos aislados, se concluye que los sistemas de generación híbrido que incluyen en su operación generadores fotovoltaicos, eólicos, a diésel y baterías resultan ser más

competitivos, por lo cual se busca optimizar su configuración de modo que puedan representar un sistema de energía sustentable para áreas aisladas.

Varios estudios se han realizado sobre el uso de sistemas de generación híbrido en zonas aisladas para mostrar sus beneficios y utilidad para las comunidades que no tienen acceso a este servicio. Por ejemplo, en (Bin, Shaidul, & Adbus, 2019) se propone el modelado y optimización de un sistema de potencia híbrido para la isla de Saint Martin en Bangladesh, el mismo que está conformado por generadores fotovoltaico y eólico, además de un generador diésel, un convertidor DC-AC y un banco de baterías. Los modelos de cada uno de estos elementos son ingresados dentro de software HOMER PRO, y se obtiene como resultados que la utilización de energías renovables puede suplir energía a costos más bajos que otras fuentes de energía, una vez realizada la optimización. Un sistema similar realizado únicamente con fines de simulación es presentado en (López, Yahyaoui, Tadeo, & Arnaltes, 2019) el cual incluye además un conjunto de turbinas eólicas para el suministro de energía a una carga variable en una zona aislada. Sin embargo, para este caso se plantea una estrategia de gestión de energía (EMS) para este sistema autónomo híbrido, donde los elementos del sistema como el EMS son modelados y simulados en Matlab/Simulink. Como resultado de este estudio, se puede decir que a partir del uso de una EMS es posible priorizar el uso de energía renovable y abastecer a la carga al utilizar la mayor cantidad posible de energía limpia, con un uso mínimo de generadores a diésel.

Es posible ver que mediante técnicas de control y optimización se puede conseguir un uso eficiente de un sistema de generación híbrido cuyos conceptos no son ajenos al contexto nacional. Con el propósito de abastecer de energía a zonas aisladas del Ecuador en (Lata-García, Reyes-Lopez, Jurado, Fernández-Ramírez, & Sanchez, 2017) se diseña un sistema de generación que integra energías renovables (paneles

fotovoltaicos e hidro-cinéticos), un sistema de almacenamiento basado en baterías y un generador diésel utilizado como respaldo para la generación de electricidad en la isla Santay. Este sistema fue optimizado a partir del modelamiento matemático de cada componente, donde se evaluó su rendimiento en Matlab/Simulink, y también mediante el dimensionamiento técnico-económico realizado con la ayuda del software HOMER PRO. Los resultados muestran que el sistema híbrido diseñado mediante ambos métodos asegura un suministro de electricidad confiable para la aplicación autónoma.

De forma general se observa que este tipo de sistemas están constituidos por varias fuentes de generación de potencia y sistemas de almacenamiento de energía (ESS), los cuales son conocidos como fuentes de generación distribuida dentro del contexto de las micro redes y son utilizados para proveer de potencia a áreas de carga local. Particularmente, existen varias tecnologías utilizadas para la construcción de ESS entre las cuales se destacan las mecánicas (hidro bombeado, aire comprimido y volantes), electromagnéticas (almacenamiento de energía magnética superconductora), electroquímica (hidrogeno, baterías normales y de flujo) y de tipo térmico (Tephiruk, Kanokbannakorn, Kerdphol, Mitani, & Hongesombut, 2018). Uno de los principales problemas en el empleo de los sistemas de almacenamiento de energía recae en el hecho de encontrar un método de control que procure una adecuada tasa de carga/descarga con el fin de evitar daños físicos y aumentar la vida útil del almacenador.

Varios métodos han sido empleados para el control de ESS, donde gran parte de ellos requieren del modelo matemático de la planta para realizar el diseño del controlador. En este contexto, el controlador más empleado es el Proporcional-Integral (PI) debido a su facilidad de uso y desempeño satisfactorio en cuanto a seguimiento de referencia. Este tipo de controlador fue utilizado en (Etxeberria, Vechiu, Camblong, &

Vinassa, 2011) como parte del control para un lazo interno de corriente y uno externo de voltaje dentro de un sistema híbrido de almacenamiento de energía, cuyos resultados muestran la deficiencia en la respuesta de este tipo de controladores cuando el punto de operación está fuera del rango establecido.

Otro tipo de control normalmente utilizado es el robusto, cuyo objetivo principal es hacer que el desempeño del sistema no se degrade hasta tener un nivel inaceptable a pesar de que se produzca un cambio en la dinámica del proceso (Damen & Weiland, 2002). Este aspecto lo diferencia del primer control dado que le permite cambiar de forma activa las condiciones de operación del sistema para brindar una respuesta rápida frente a perturbaciones. Su empleo como parte del control en el inversor de potencia contribuye a un incremento en la velocidad para la entrega de potencia activa, además de reducir las fluctuaciones de frecuencia y voltaje.

Por otro lado, existe un conjunto de métodos de control que presenta la característica de no necesitar del modelo matemático de la planta a priori, por lo que su utilización se vuelve más flexible y versátil. Uno de estos métodos es conocido como control heurístico que se basa en la utilización de reglas empíricas, conjeturas fundamentadas, juicios intuitivos o el sentido común para establecer criterios de control sobre una determinada planta. De forma general esta técnica de control realiza estrategias en base a información de fácil acceso, pero poco aplicable para controlar procesos de resolución de problemas en seres humanos y máquinas (Huang & Cheok, 2007). En este contexto, un tipo de control que apareció para formalizar un método heurístico es el control de lógica difusa que ha sido ampliamente usado en este campo y es considerado como un método de control eficiente. Está basado en el conocimiento y experiencia de expertos para sentar las bases del diseño inteligente, características que le permiten hacer frente a ambigüedades complejas e incertidumbre, y adecuado

para sistemas de múltiples entradas (Tephiruk, Kanokbannakorn, Kerdphol, Mitani, & Hongesombut, 2018).

En base a lo expuesto anteriormente se puede concluir que la utilización de sistemas de generación híbrida para el abastecimiento de energía eléctrica por parte de comunidades aisladas donde este servicio es inaccesible se ha convertido en una solución prometedora. Sin embargo, la dependencia al uso de combustibles fósiles con el tiempo se convierte en un problema que requiere atención, lo que abre el paso al empleo de fuentes de energía renovables que sirven de soporte para el abastecimiento. La definición completa del sistema, de modo que asegure su estabilidad y confiabilidad, se encuentra en la combinación de sistemas de generación y almacenamiento, que brinden una forma de abastecer y almacenar energía, y que funcionen bajo el control de una estrategia de gestión de energía adecuada.

### **Justificación e Importancia**

La producción de energía eléctrica y la posibilidad de abastecer de este servicio a todas las comunidades y pueblos ya sea de zonas urbanas como rurales, se ha vuelto un desafío a nivel mundial para conseguir el objetivo de brindar un buen nivel de vida a las personas. Sin embargo, esta necesidad año tras año aumenta hasta llegar en cierto punto a ser insostenible dado el rápido crecimiento de la urbanización de zonas que antes difícilmente podrían ser habitadas. Por esta razón estas zonas no presentan una infraestructura que les permita el abastecimiento de electricidad por parte de fuentes tradicionales como puede ser un sistema nacional interconectado de energía eléctrica. El uso de combustibles fósiles por mucho tiempo ha constituido una necesidad debido a su facilidad de adquisición y uso dentro de generadores de electricidad basados en estos combustibles. No obstante, este recurso con el tiempo disminuye y actualmente

su uso provoca estragos en el medio ambiente debido a los desechos y emisiones de gases contaminantes resultantes de su utilización.

A pesar de lo que se creería, el uso de netamente energías renovables en este tipo de zonas aisladas es un tema que requiere de más estudios debido a la complejidad de realizarlos y a los distintos factores ambientales y climáticos que condicionan la producción de energía eléctrica por parte de estas fuentes. Además, su uso presenta en muchos casos una reducida eficiencia y altos costos de producción en la actualidad (Karakosta, Pappas, Marinakis, & Psarras, 2013). Por esta razón se proponen varios esquemas y configuraciones para dar solución a este problema, uno de los más empleados son los sistemas de generación híbridos, que combinan tanto el uso de fuentes renovables como generadores basados en combustibles fósiles para brindar una mayor robustez en el abastecimiento de electricidad.

El reto de los investigadores dedicados a este tema consiste ahora en la búsqueda de métodos para optimizar el funcionamiento de estos sistemas de forma que puedan abastecer de energía eléctrica a una población de acuerdo a sus necesidades y que al mismo tiempo disminuya el uso de combustibles fósiles. Esto hace que también se reduzcan los costos y emisiones de gases contaminantes asociados a la utilización de este tipo de recursos. Sin embargo, la optimización del sistema queda fuera del alcance del presente proyecto. La inclusión de un sistema de almacenamiento dota al sistema de generación de estabilidad y seguridad frente a posibles situaciones anormales. También permite la inclusión de funciones tales como el soporte en momentos de baja generación de energía y el almacenamiento de esta cuando se producen excedentes. El desafío en el funcionamiento de estos sistemas de almacenamiento está ligado al correcto uso de la energía tanto en la carga como en la descarga, donde este es uno de los factores más críticos que condicionan el tiempo de

vida e integridad física del sistema. Debido a esto se han propuesto varios controladores destinados a este fin debido a la gran importancia que tienen estos elementos dentro del sistema de generación híbrido.

En Ecuador, hasta el año 2018 la cobertura anual del servicio eléctrico fue 97.05% (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2018), lo cual resulta en incluso una reducción con respecto al año 2017 (97.33%) (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2017). Dentro de estas cifras se hace referencia a la provincia de Santa Elena, lugar seleccionado para representar la zona aislada dentro del presente trabajo, la cual presenta una de las cifras más bajas de cobertura del servicio eléctrico en el país para el año 2018, correspondiente a 88.37%. En este contexto se puede observar que existe una creciente necesidad en aumentar la cobertura del servicio eléctrico para estas zonas aisladas o rurales del país.

Por estas razones, el presente trabajo de investigación tiene como finalidad realizar el diseño y dimensionamiento del sistema de generación y almacenamiento que permita comparar distintas configuraciones para un sistema de generación híbrido de modo que pueda suministrar de potencia a una zona aislada del Ecuador. Se busca también analizar su desempeño en cuanto a consumo de combustible, emisiones de gases contaminantes y potencia desperdiciada producto de su funcionamiento, además de comparar el desempeño de controladores empleados en el sistema de almacenamiento. A partir de este estudio se brinda un esquema base para la construcción e implementación de un sistema de generación híbrido para abastecer de potencia eléctrica a zonas aisladas del país con énfasis en la reducción del consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes, lo que garantiza un correcto funcionamiento del sistema de almacenamiento asociado.

## **Alcance del Proyecto**

El presente proyecto está destinado a realizar el diseño, dimensionamiento y simulación de un sistema de generación híbrido para abastecer de energía eléctrica a una zona aislada del Ecuador que en un principio utiliza un generador basado en combustibles fósiles como elemento principal. De forma general, el modelamiento del sistema está compuesto por un generador a diésel y un panel fotovoltaico, con respecto al sistema de almacenamiento, estará conformado por un almacenador térmico y uno eléctrico. El impacto de la integración de fuentes de energía renovables y un sistema de almacenamiento será evaluado a través de la comparación de varias configuraciones, donde se toma como punto de partido el empleo de únicamente el generador a diésel. Para esta comparación se utilizarán perfiles de consumo de potencia basados en datos reales de residencias en zonas aisladas del país, además de la utilización de datos meteorológicos reales para las fuentes de energía renovables tomados del sitio web Solcast de modo que se pueda evaluar el desempeño que tendría el sistema frente a condiciones variantes propias de la realidad.

El desempeño de cada uno de los escenarios planteados será evaluado en base a parámetros propios del sistema de generación híbrido, entre los cuales se encuentra la potencia total generada, potencia residual obtenida, potencia utilizada, consumo total de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera. Estos dos últimos utilizados como parámetros de desempeño principales dado que son los aquellos cuyos valores se intentan minimizar a partir de la integración del resto de elementos del sistema de generación híbrido. Para cada uno de los escenarios se plantea la configuración de los elementos tanto de generación como de almacenamiento de energía. También se propone el diseño de controladores que permitan conseguir que el sistema cumpla con el objetivo de abastecer de potencia a la comunidad planteada en función de sus

necesidades expresadas a través del perfil de consumo, de modo que todo el sistema trabaje de forma conjunta con el objetivo de abastecer de energía a una comunidad aislada.

Adicionalmente, debido a la importancia que tiene el sistema de almacenamiento dentro del proyecto planteado, es necesario asegurar que su funcionamiento en la simulación este de acuerdo con condiciones reales que permitan una operación segura y un tiempo de vida útil largo para el almacenador en la vida real. Con este fin se realiza el diseño de estrategias de gestión de la energía a partir de controladores que permitan obtener el funcionamiento deseado en el almacenador para mantener dentro de valores adecuados las tasas de potencia que ingresan y salen del almacenador. Para lograr esto se realiza la comparativa entre el control basado en reglas o control heurístico que utiliza el conocimiento empírico del sistema para la generación de reglas de control, y el control basado en lógica difusa (FLC) para conseguir el mejor funcionamiento del almacenador.

El modelamiento matemático de los elementos, así como los escenarios planteados para realizar las comparaciones y evaluación de desempeño del sistema de generación híbrido serán realizados a partir de simulaciones en el software Matlab y la herramienta de Simulink. Mediante programación por bloques se construye digitalmente el sistema y se incluyen los parámetros y datos de entrada necesarios para obtener resultados que permitan determinar la configuración y algoritmos de control que brinden el mejor desempeño en función de los parámetros planteados para que posteriormente puedan servir de base en la implementación física del modelo. Estos modelos matemáticos serán utilizados para obtener la potencia de los elementos que forman parte del sistema de generación, así como simular la potencia que será almacenada por el sistema de almacenamiento planteado. Sin embargo, estos modelos no intervendrán

en el diseño de las estrategias de gestión de energía para el almacenador eléctrico dado que están basadas en controladores que no requieren del conocimiento de un modelo matemático. El objetivo principal del trabajo es evaluar el desempeño de un sistema en cuanto a consumo de combustible, emisiones de CO<sub>2</sub> y potencia residual dentro de una comunidad aislada que es abastecida únicamente por un generador a diésel. Para posteriormente compararlo con respecto a un escenario que cuenta con un sistema de generación y almacenamiento híbrido que permita determinar la mejor configuración y estrategia de gestión de energía para la situación presentada.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Realizar el diseño y simulación de una estrategia de gestión de energía para un sistema de generación y almacenamiento híbrido mediante el empleo de un modelo matemático, perfil de consumo de potencia y datos meteorológicos reales para el abastecimiento de potencia dentro de una comunidad aislada del Ecuador que será implementado a través de Matlab/Simulink.

### ***Objetivos específicos***

- Realizar el modelamiento del sistema de generación y almacenamiento híbrido mediante el uso de modelos matemáticos del generador a diésel, panel fotovoltaico, y almacenadores térmico y eléctrico que permitan obtener una aproximación a su comportamiento real.
- Diseñar algoritmos para la determinación de la velocidad de giro óptima del generador a diésel que permitan obtener la mayor cantidad de potencia generada adaptada a las condiciones del escenario propuesto.
- Diseñar estrategias de gestión de energía basadas en control heurístico y control basado en lógica difusa (FLC) para determinar su desempeño en el

control de la tasa de carga/descarga del almacenador eléctrico que forma parte del sistema de almacenamiento.

- Comprobar el funcionamiento de las simulaciones con las diferentes configuraciones, escenarios y estrategias de gestión de energía diseñadas mediante el uso de datos de consumo de potencia y meteorológicos propuestos para comparar el desempeño general obtenido.

### **Descripción del Proyecto**

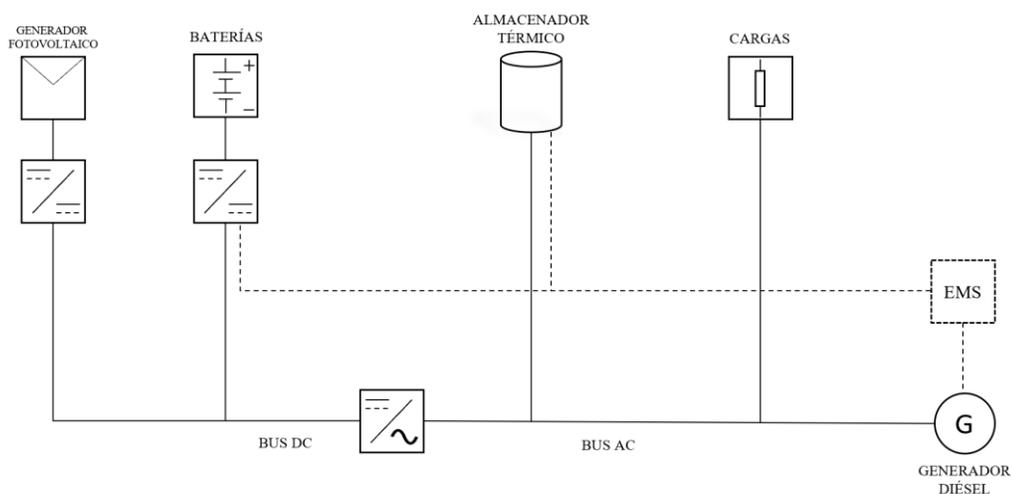
Como se mencionó anteriormente el objetivo del presente proyecto consiste en el diseño y simulación de un sistema de generación y almacenamiento híbrido que será utilizado para abastecer de potencia a una comunidad aislada del Ecuador, específicamente a una zona ubicada en la provincia de Santa Elena. Provincia seleccionada debido a que hasta el año 2018 presenta el porcentaje de cobertura de servicio eléctrico más bajo del país, lo cual la vuelve una candidata óptima para la aplicación de un sistema de generación híbrido. El sistema propuesto para este proyecto consiste desde el punto de vista de la generación de un generador a combustible diésel (DG) y conjunto de paneles fotovoltaicos (PV). Por otro lado, el almacenamiento de energía se realiza de forma eléctrica y térmica, mediante el uso de un banco de baterías y un tanque de agua, respectivamente. De este último almacenador se tiene previsto que el agua caliente generada será utilizada por la comunidad planteada.

La arquitectura de la microrred propuesta se puede observar en Figura 1, donde cabe mencionar que se presenta la estructura del sistema completo, sin embargo, a lo largo del presente trabajo se realizarán comparaciones en función de los casos de estudio propuesto, para determinar la efectividad de la inclusión de un sistema de generación y almacenamiento híbrido. En Figura 1 se pueden observar todos los

elementos que forman parte de la microrred propuesta y las relaciones de conversión de DC a AC para conseguir abastecer de potencia a las cargas del conjunto de residencias propuesto, así como el almacenamiento de potencia excedente en forma de agua caliente.

**Figura 1**

*Arquitectura completa del sistema de generación y almacenamiento híbrido*



Dentro del esquema se propone la inclusión de un Sistema de Gestión de Energía (EMS) mediante el cual se realizará el control de la carga y descarga de los elementos que almacenan energía, como son las baterías y el almacenador eléctrico, en función de las necesidades de potencia de las cargas. Este sistema también realiza el control de la potencia que necesita generar el generador a diésel para abastecer de potencia al conjunto de residencias una vez que se haya utilizado el recurso renovable del panel fotovoltaico. Dentro de este último control se incluye el diseño de un algoritmo que permita ajustar la velocidad de giro del motor acoplado al generador a la potencia establecida como referencia de forma que se consiga el mayor ahorro de combustible y de emisiones de CO<sub>2</sub>.

La comunidad aislada seleccionada para el presente trabajo está ubicada en el cantón Rio Verde provincia de Santa Elena, de la cual se tomarán los datos meteorológicos de irradiación y temperatura del año 2020 como datos de entrada utilizados para la simulación de la generación de potencia fotovoltaica. Los datos de consumo para el conjunto de residencias serán simulados a partir de la generación de un patrón base semanal en función de las principales cargas utilizadas, su consumo y tiempo estimado de uso para una sola vivienda, del cual se deriva el consumo anual para el periodo de tiempo propuesto.

Las simulaciones realizadas con estos elementos están destinadas a la comparación del desempeño del sistema de generación híbrido en cuanto al consumo de combustible, emisiones de CO<sub>2</sub> y potencia excedente generada, para ello se abordarán dos casos de estudio. En el primero se utiliza un solo generador a diésel para abastecer de potencia a la comunidad; mientras que en el segundo caso se observará el efecto de incluir un sistema fotovoltaico y de almacenamiento compuesto por los elementos antes propuestos. Un segundo conjunto de simulaciones será llevado a cabo sobre el sistema de generación híbrida, en el cual se analizarán los resultados de utilizar un EMS basado en un control heurístico para el control de carga/descarga del almacenador eléctrico (baterías) en comparación con la utilización de un control basado en lógica difusa (FLC). El principal objetivo es mejorar la gestión de energía del sistema de generación híbrida, a la vez que aumentar el tiempo de vida útil de las baterías con consideración en las condiciones de funcionamiento reales de este tipo de elementos dentro de una microrred.

## **Capítulo II. Modelos Matemáticos del Sistema de Generación y Almacenamiento**

### **Sistema de Generación**

El sistema de generación está compuesto por los generadores diésel y fotovoltaico, los cuales son utilizados conjuntamente para la generación de potencia que permita abastecer de energía eléctrica a las cargas propuestas para la comunidad aislada en estudio. El estudio de su comportamiento y capacidad de generación se realiza mediante el uso de modelos matemáticos que puedan ser utilizados para simular el comportamiento real de estos elementos, con énfasis en los parámetros y características que permitan obtener un comportamiento acercado a la realidad, de forma que se pueda realizar un mejor análisis y obtener conclusiones más exactas.

#### ***Generador a diésel***

El modelo del generador a diésel se puede realizar a partir de la división en dos partes fundamentales que son el modelo eléctrico y el sistema de excitación, donde la velocidad angular es la variable de mayor importancia dado que en base a ella se determina la salida final del generador (Jiménez & Rivas, 2018). Un motor a diésel, que es el encargado de mover el eje del generador y por lo tanto es la principal fuente de energía del sistema, se considera como un sistema altamente no lineal, donde sus características varían en función de la potencia de salida, velocidad y temperatura. Debido a esto se vuelve complicado encontrar expresiones matemáticas que describan el comportamiento del mismo y puedan ser utilizadas para el diseño de un controlador.

Dentro de estos aspectos también se mencionan aspecto tales como el comportamiento variante en el tiempo del motor, dado que la velocidad del mismo depende de procesos como: inyección de combustible, compresión de cámaras y combustión, los cuales a su vez dependen a su vez de la carga y velocidad en cada instante (Morales, 2010). De igual forma se debe considerar el retardo en el sistema de

combustión que se produce debido a la forma en la que se genera el torque mecánico. Esto tiene como consecuencia un desfase entre la señal enviada por el controlador y los procesos correspondientes al paso de combustible y cambios en el torque del motor.

Sin embargo, al considerar todos estos aspectos es posible determinar un modelo matemático que recoja todas las características antes mencionadas y las incluya dentro de la simulación de la máquina. Un aspecto que es necesario mencionar es que el eje del motor y el generador van acoplados rígidamente, por lo cual la potencia generada por el motor se transmite al generador (Soto, 2017), por lo cual la potencia eléctrica necesaria a la salida será proporcionada por el motor de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_{sal} = P_{in} - P_{ser} - P_{perd} \quad (1.1)$$

Donde  $P_{sal}$  es la potencia eléctrica de salida a través del generador,  $P_{in}$  es la potencia entregada por el motor,  $P_{ser}$  es la potencia suministrada a elementos propios como el sistema eléctrico, excitación del generador, sistema de control, AVR, entre otros. Y  $P_{perd}$  son las pérdidas eléctricas y mecánicas, como son las pérdidas en el entrehierro del generador, calentamiento de circuitos de armadura y de excitación por efecto Joule, fricción o vibraciones.

Para el presente trabajo se considera que la eficiencia del conjunto motor diésel – generador es máxima, por lo cual la potencia eléctrica a la salida será igual a la potencia generada por el motor. Para el modelo del generador se hace énfasis en las expresiones matemáticas que describen la dinámica del motor, con el objetivo de diseñar un controlador de velocidad, mediante el cual se ajuste la potencia generada. De este modo el generador del tipo síncrono utilizado para este propósito se presenta como transparente al modelo matemático de la máquina.

De acuerdo a las consideraciones anteriores, se presenta el modelo de generador a diésel propuesto en (Jiménez & Rivas, 2018) el cual está compuesto por tres bloques principales que se presentan a continuación.

- Actuador

Es el elemento cuya función dentro del motor es controlar el flujo de combustible en la cámara de combustión, el cual puede recibir señales de tipo neumático, hidráulico o eléctricas, para obtener a su salida un flujo específico de combustible. La función de transferencia que define este bloque está dada por la siguiente expresión.

$$\phi(s) = \frac{k_1 \cdot k_2}{1 + \tau_1 s} \cdot I(s) \quad (1.2)$$

Donde  $\phi(s)$  es el flujo específico de combustible e  $I(s)$  es la señal de entrada al actuador que puede ser de cualquiera de los tres tipos mencionados. La función de transferencia muestra un desfase de primer orden, donde  $k_1$  y  $k_2$  son constantes de proporcionalidad del actuador y de la cantidad de torque mecánico por unidad de combustible, respectivamente. Y  $\tau_1$  es un retardo que depende de la temperatura del combustible [s].

- Sistema de combustión

A continuación del bloque del actuador se encuentra el sistema de combustión el cual está encargado de convertir el flujo de combustible proveniente del bloque anterior en torque mecánico. La función de transferencia que define este bloque está dada por la siguiente expresión.

$$\tau(s) = \phi(s) \cdot k_3 e^{-\tau_2 s} \quad (1.3)$$

Donde  $\tau(s)$  representa el torque mecánico [Nm], en este bloque se presenta un retardo debido a la combustión representado por  $\tau_2$  [s] y la constante de torque del motor  $k_3$ .

- Volante de inercia

El ultimo bloque del modelo es conocido como volante de inercia, el cual representa una aproximación de los efectos mecánicos que experimenta el rotor del motor. La entrada del bloque es el torque mecánico producido por el bloque anterior y este bloque realiza su transformación a velocidad angular por medio del cigüeñal. La función de transferencia que describe este bloque está dada por la siguiente expresión.

$$\omega(s) = \frac{1}{Js + B} \cdot \tau(s) \quad (1.4)$$

Donde  $\omega(s)$  es la velocidad de salida en el eje del motor [rpm], J es el coeficiente de inercia [kg m<sup>2</sup>] y B es el coeficiente de fricción.

Adicionalmente al modelo del generador a diésel se incluye un controlador de velocidad, cuyo diseño será detallado en una sección posterior. Este controlador es el encargado de enviar una señal al motor la cual indica la velocidad de salida de referencia que debe tener, además de los valores máximos de operación con el objetivo de evitar daños en el motor. De forma general este controlador será diseñado para controlar la velocidad del motor de modo que pueda suplir la demanda de potencia con el menor consumo de combustible posible.

Los valores de las constantes descritas anteriormente se especifican a partir de las características específicas del motor. Sin embargo, para pequeños intervalos de tiempo las variaciones son despreciables, por lo cual se tienen valores típicos para el

desarrollo de un modelo. De acuerdo a (Jiménez & Rivas, 2018) se presentan estos valores en Tabla 1.

**Tabla 1**

*Valores típicos de los parámetros para el modelo del motor diésel*

Parámetro	Valor	Definición
$k_1$	1	Constante de proporcionalidad del actuador
$k_2$	1	Constante de proporcionalidad del controlador
$k_3$	0.8 – 1.5	Constante de torque del motor
$\tau_1$	0.05 – 0.2	Retardo del actuador
$\tau_2$	0.0 – 0.25	Retardo de combustión
$J$	2.5	Coefficiente de inercia
$B$	1	Coefficiente de fricción

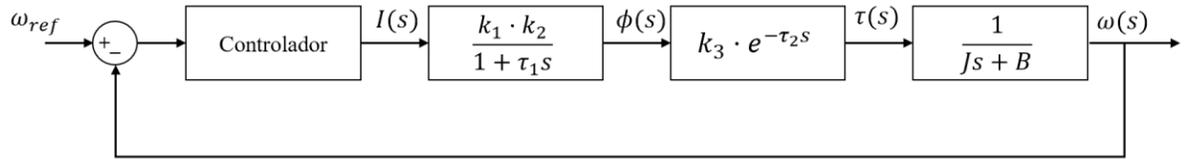
Nota: Tomado de *Modelado y simulación de un sistema de generación de energía eléctrica a base de diésel*, por Jiménez y Rivas, 2018.

La función de transferencia en lazo abierto del modelo del generador a diésel se muestra a continuación, y a su vez en Figura 2 se muestra el diagrama de bloques del modelo, el cual consiste en la combinación de las tres funciones de transferencia vistas anteriormente, donde se incluye el control en lazo cerrado para el control de velocidad. Este diagrama es el que será utilizado dentro de la simulación para obtener el comportamiento del generador diésel y la potencia generada por el mismo.

$$G(s) = \frac{k_1 k_2 k_3 \cdot e^{-\tau_2 s}}{(Js + B)(1 + \tau_1 s)} \quad (1.5)$$

**Figura 2**

Diagrama de bloques del motor diésel



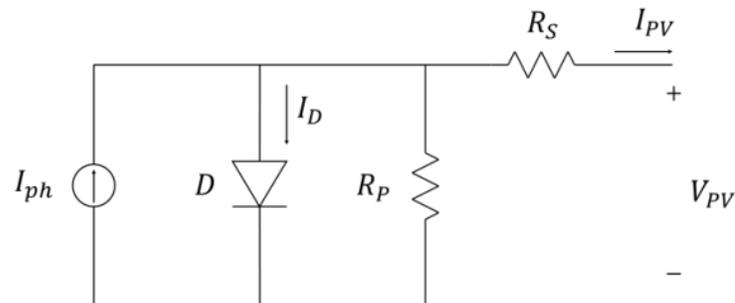
Nota: Adaptado de *Modelado y simulación de un sistema de generación de energía eléctrica a base de diésel*, por Jiménez y Rivas, 2018.

### Panel fotovoltaico

De forma general un panel fotovoltaico está compuesto por un conjunto en paralelo de células fotovoltaicas, las cuales son unidades básicas de generación eléctrica (Zapata & Santos, 2015). Una celda solar está construida a partir de una oblea de silicio, fabricada mediante la unión de dos semiconductores p – n, los cuales mediante el fenómeno del efecto fotoeléctrico convierte la radiación solar en energía eléctrica de corriente directa (Granda, y otros, 2013). El modelo matemático de una celda fotovoltaica se obtiene de una representación eléctrica, que se muestra en Figura 3 y depende de la radiación solar y temperatura de la celda.

**Figura 3**

Circuito equivalente de una celda solar



Nota: Adaptado de *Modelo y Simulación de un Sistema Fotovoltaico Portátil*, por Zapata y Santos, 2015.

Dentro del esquema planteado se incluye una fuente de corriente  $I_{ph}$ , que es proporcional a la radiación solar; un diodo, D, en paralelo; una resistencia de derivación,  $R_p$ , que representa las pérdidas de corriente; y una resistencia intrínseca en serie,  $R_s$ . Por lo general la resistencia de perdidas en serie suele tomar valores muy pequeños, al contrario que la resistencia en paralelo que puede tomar valores muy grandes, por lo que puede ser despreciada dentro del modelo, para obtener de este modo la ecuación característica de una celda fotovoltaica (Villalva, Gazoli, & Filho, 2009).

$$I_{PV} = \left\{ I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_{PV} / N_s + R_s \cdot I_{PV} / N_p}{A \cdot V_t} \right) - 1 \right] \right\} N_p \quad (1.6)$$

Donde  $I_{PV}$  es la corriente de salida del panel fotovoltaico,  $I_{ph}$  es la fotocorriente de la celda,  $I_0$  es la corriente inversa de saturación del diodo,  $V_{PV}$  es el voltaje de salida del panel fotovoltaico,  $A$  es el factor de idealidad de la celda y  $V_t$  es el voltaje térmico del diodo dado por la siguiente expresión.

$$V_t = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q} \quad (1.7)$$

Donde  $N_s$  es el número de celdas conectadas en serie,  $q$  es la carga del electrón ( $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C),  $k$  es la constante de Boltzmann ( $k = 1.3805 \times 10^{-23}$  J/K), y  $T$  es la temperatura absoluta de la unión p – n [°K]. Por su parte la fotocorriente de la celda está dada por la siguiente expresión.

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} [I_{SC} - K_i (T_C - T_{STC})] \quad (1.8)$$

Donde  $G$  es la irradiancia solar [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $G_{\text{STC}}$  es la irradiancia en condiciones estándar (STC) [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $I_{\text{SC}}$  es la corriente de cortocircuito de la celda solar en condiciones estándar,  $K_i$  es el coeficiente de corriente/temperatura de cortocircuito,  $T_c$  es la temperatura de funcionamiento de la celda solar [ $^{\circ}\text{K}$ ] y  $T_{\text{STC}}$  es la temperatura de referencia en STC [ $^{\circ}\text{K}$ ].

Por último, el valor de la corriente inversa de saturación,  $I_0$ , se obtiene de la siguiente expresión la cual varía de acuerdo a la temperatura.

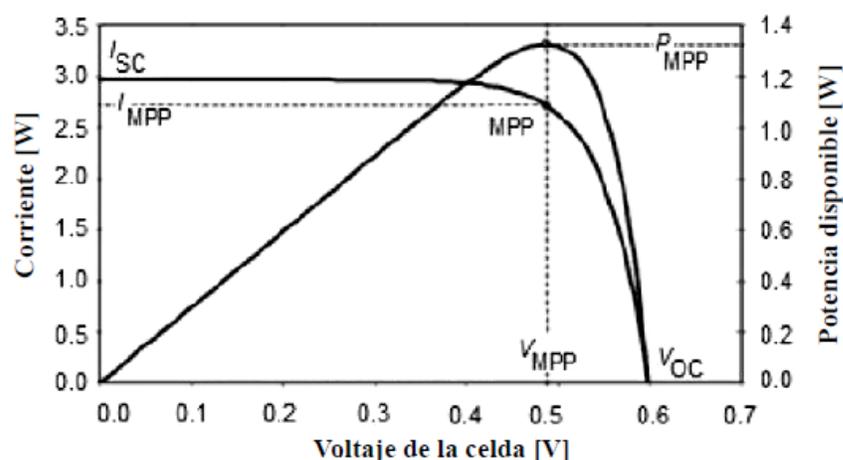
$$I_0 = \frac{I_{\text{SC}} + K_i \Delta_T}{\exp\left(\frac{V_{\text{OC}} + K_v \Delta_T}{A \cdot V_t}\right) - 1} \quad (1.9)$$

Donde  $I_{\text{SC}}$  es la corriente de cortocircuito en condiciones estándar,  $\Delta_T = T - T_n$  es la diferencia entre la temperatura actual y la nominal,  $V_{\text{OC}}$  es el voltaje de circuito abierto en condiciones estándar y  $K_v$  es el coeficiente de tensión/temperatura en circuito abierto.

Las características típicas de una celda solar se representan por medio de graficas voltaje – corriente y voltaje – potencia, como se observa en Figura 4 donde se ubican los puntos más representativos como: la corriente de cortocircuito ( $I_{\text{SC}}$ ), el voltaje de circuito abierto ( $V_{\text{OC}}$ ), el punto de máxima potencia (MPP), la corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{\text{MPP}}$ ), el voltaje en el punto de máxima potencia ( $V_{\text{MPP}}$ ) y la potencia en el punto de máxima potencia ( $P_{\text{MPP}}$ ).

**Figura 4**

Curva voltaje - corriente y voltaje - potencia de una celda solar



Nota: Tomado de *Modelado y simulación de celdas y paneles solares*, por Granda, Orta, Díaz, Jiménez, Osorio y Gonzáles, 2013.

A partir de estas ecuaciones se puede realizar el modelamiento de un panel fotovoltaico, mediante la combinación de celdas en serie y paralelo para obtener diferentes niveles de voltaje y corriente a la salida del panel. Con el objetivo de generar la mayor energía posible aun con cambios en la radiación y temperatura, se suelen utilizar métodos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Uno de los más conocidos es el algoritmo de Perturba y Observa (P&O) que consiste en variar la tensión del panel de forma periódica en un sentido determinado, luego medir el voltaje y corriente generados para calcular la potencia producida y compararla con mediciones tomadas en un tiempo anterior.

El presente trabajo toma en cuenta únicamente la potencia generada por el panel fotovoltaico, por lo cual para el modelamiento del mismo se utiliza el modelo propuesto en (Arcos, et al., 2017), el cual depende de los valores históricos de irradiación, temperatura, y parámetros de una celda solar. Además, se considera que en

dichas condiciones la transferencia de potencia es máxima, por lo cual no se hace necesario el uso de un algoritmo de seguimiento de máxima potencia para determinar la generación del panel.

De acuerdo al modelo, la potencia del panel fotovoltaico va a depender de diversos factores entre los que se encuentran el material, la temperatura, la irradiación incidente, entre otros. La potencia de salida está representada por la siguiente expresión.

$$P_{PV} = P_{STC} \cdot \frac{G(\beta, \alpha)}{G_{STC}} \cdot [1 + \gamma(T_C - T_{STC})] \quad (1.10)$$

Donde  $P_{STC}$  es la potencia de salida del panel [W] bajo condiciones de prueba estándar (STC),  $G(\beta, \alpha)$  es la irradiación incidente en el plano de los paneles [ $W/m^2$ ],  $\gamma$  es el coeficiente de temperatura [ $\%/^{\circ}C$ ],  $T_{STC}$  es la temperatura en STC [ $^{\circ}C$ ] y  $T_C$  es la temperatura de la celda [ $^{\circ}C$ ] que es expresada de la siguiente forma:

$$T_C = (T_a - 273) + \frac{G(\beta, \alpha)}{800} \cdot (NOCT - 20) \quad (1.11)$$

Donde  $T_a$  es la temperatura ambiente [ $^{\circ}K$ ] y NOCT es la temperatura nominal de operación de la celda [ $^{\circ}C$ ]. Los parámetros de  $P_{STC}$ ,  $\gamma$  y NOCT son valores dados por el fabricante del panel, para el caso del valor de NOCT para módulos comunes en el mercado, este puede variar entre 42 y 46  $^{\circ}C$ . Se obtiene la siguiente expresión, que en base a lo mencionado puede variar entre 0.0027 y 0.032  $^{\circ}C/(W/m^2)$ :

$$C_t = \frac{NOCT(^{\circ}C) - 20}{800(W / m^2)} \quad (1.12)$$

De forma alternativa si el valor de NOCT no es conocido, se utiliza como aproximación el valor de  $C_t = 0.030^{\circ}C / (W / m^2)$ . El valor de NOCT de este modo

corresponde a esquemas de montaje que permiten la convección de aire libre a ambos lados de los paneles fotovoltaicos (Pigueiras, 2005).

### **Sistema de Almacenamiento**

El sistema de almacenamiento seleccionado es de tipo térmico y eléctrico, de modo que puedan ser utilizados para almacenar y posteriormente utilizar la energía generada de forma excedente, por cualquiera de los elementos de generación, con el fin de aprovechar lo máximo posible dicha potencia. Debido a que el sistema de generación híbrido trabaja de forma aislada a la red eléctrica, la inclusión de un sistema de almacenamiento se vuelve fundamental en el hecho de que brinda estabilidad al sistema y mediante el uso de un EMS es posible gestionar acciones de carga en periodos de tiempo donde la generación exceda al consumo, o por su parte utilizar la energía almacenada en momentos donde la generación no pueda abastecer completamente las necesidades de la carga.

### ***Almacenador térmico***

Un almacenador de energía de acuerdo a (Rodríguez, 2015) se define como una restricción del flujo de energía, confinándola en algún tipo de depósito por un periodo de tiempo determinado, donde las dos maneras típicas son: aislamiento del ambiente circundante y utilizar un material de gran inercia térmica. La principal razón para utilizar almacenadores de energía térmica es la conservación de energía, que de otra forma se perdería la oportunidad de poder utilizarla posteriormente en alguna otra aplicación.

El almacenamiento de energía térmica puede clasificarse en activa y pasiva, además puede verse desde dos puntos de vista complementarios, cuyas características principales se presentan en Tabla 2.

**Tabla 2***Tipos de almacenamiento térmico*

	<b>Por la relación con el medio</b>	<b>Por el concepto de almacenamiento</b>
<b>Activo</b>	<p>- Sistemas térmicamente aislados del ambiente con el que ellos están supuestos a interactuar.</p> <p>- Se requiere un fluido intermedio de transferencia térmica entre el medio de almacenamiento y el ambiente.</p>	<p>La energía térmica es transferida al medio de almacenamiento por convección forzada.</p>
<b>Pasivo</b>	<p>- El ambiente y el medio de almacenamiento intercambian la energía térmica de forma directa.</p> <p>- No requieren equipos ni energía adicional para almacenar o transferir la energía térmica.</p>	<p>El medio de almacenamiento es cargado y descargado, térmicamente, al entrar en contacto directo con un fluido.</p>

Existen tres formas en que se puede almacenar la energía térmica:

- En forma de calor sensible.
- En forma de calor latente.

- Por procesos termoquímicos o combinación de estos.

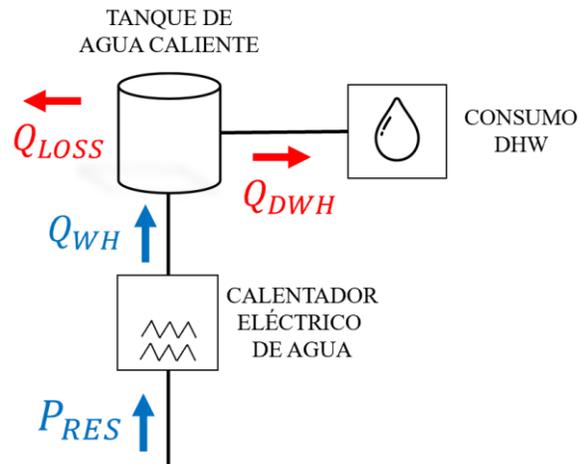
La forma más común de almacenamiento es por medio de calor sensible. La energía térmica transferida al medio de almacenamiento hace que este aumente o disminuya su temperatura, es decir, durante los procesos de carga y descarga, el almacenamiento cambia de temperatura. Por lo tanto, la cantidad de energía térmica almacenada depende del calor específico, del cambio de temperatura, y de la cantidad de material almacenado (Rodríguez, 2015).

En base a los criterios antes expuestos, el almacenamiento de energía térmica, será realizado en forma de calor sensible a partir del uso de un tanque de agua y una resistencia calefactora que recibe la potencia residual del sistema, de forma que esta potencia se convierte en calor y hace que aumente la temperatura del agua.

El modelo usado para el presente trabajo está basado en el modelo propuesto en (Arcos-Aviles, y otros, 2019) donde la capacidad de almacenamiento de agua caliente en un tanque ( $Q_{ST}$ ) de un almacenador térmico de agua está dada por la siguiente expresión:

$$Q_{ST}(n) = Q_{SC}(n) + Q_{WH}(n) - Q_{LOSS}(n) - Q_{DHW}(n) \quad (1.13)$$

Donde  $Q_{SC}(n)$  es la potencia de los paneles colectores, que para este trabajo no serán considerados,  $Q_{WH}(n)$  es la potencia ingresada al calentador eléctrico de agua,  $Q_{LOSS}(n)$  son las pérdidas por convección del tanque y  $Q_{DHW}(n)$  es el consumo doméstico de agua caliente del tanque. En Figura 5 se puede observar los elementos antes mencionados que forman parte del almacenador térmico y la dirección de sus potencias en base a la ecuación 2.13.

**Figura 5***Esquema del almacenador térmico*

Otra forma de expresar la potencia almacenada dentro del tanque está dada por:

$$Q_{ST}(n) = \rho_W \cdot C_p \cdot V \cdot \Delta T_{WD}(n) \quad (1.14)$$

Donde  $\rho_W$  es la densidad del agua [ $\text{g}/\text{m}^3$ ],  $C_p$  es el calor específico del agua [ $\text{J}/\text{g K}$ ],  $V$  es el volumen de almacenamiento térmico [ $\text{m}^3$ ] y  $\Delta T_{WD}(n)$  es la variación de temperatura durante el tiempo de muestreo  $T_s$  dado por la expresión [s]:

$$\Delta T_{WD}(n) = \frac{dT_{WD}}{dt} = \frac{T_{WD}(n) - T_{WD}(n-1)}{T_s} \quad (1.15)$$

Donde los índices  $n$  y  $n - 1$  representan las muestras actual y anterior. De las expresiones mostradas anteriormente, se requiere saber cuál es la potencia de pérdidas por convección en el tanque, la cual está dada por:

$$Q_{LOSS}(n) = \frac{2\pi \cdot L \cdot k_T}{\ln(R_1 / R_2)} \cdot [T_{WD}(n) - T_{EXT}(n)] \quad (1.16)$$

Donde  $L$  es la longitud del tanque [m],  $k_T$  es la conductividad térmica del depósito de agua [ $\text{W}/\text{m K}$ ],  $R_1$  y  $R_2$  son los radios interno y externo del tanque [cm],

respectivamente,  $T_{WD}$  es la temperatura actual del tanque después del periodo de muestreo [°C] y  $T_{EXT}$  es la temperatura del ambiente [°C].

Con el uso de estas expresiones sobre las potencias involucradas en el comportamiento del tanque de almacenamiento, se estima la temperatura actual del mismo a partir de la siguiente expresión:

$$T_{WD}(n) = T_{WD}(n-1) + \frac{T_s}{\rho_w \cdot C_p \cdot V} \cdot [Q_{SC}(n) + Q_{WH}(n) - Q_{LOSS}(n) - Q_{DHW}(n)] \quad (1.17)$$

Para el presente modelo las expresiones para la potencia y temperatura del almacenador térmico quedan reducidas a:

$$Q_{ST}(n) = Q_{WD}(n) - Q_{LOSS}(n) - Q_{DHW}(n) \quad (1.18)$$

$$T_{WD}(n) = T_{WD}(n-1) + \frac{T_s}{\rho_w \cdot C_p \cdot V} \cdot [Q_{WH}(n) - Q_{LOSS}(n) - Q_{DHW}(n)] \quad (1.19)$$

Por otra parte, para la determinación de las dimensiones del tanque de modo que el mismo pueda ser fabricado, se utiliza el proceso descrito en (Mantilla & Casallas, 2015), para lo cual se determina la relación que existe entre el diámetro y la longitud del tanque (F) a partir de la expresión:

$$F = \frac{P}{C \cdot S \cdot E} \quad (1.20)$$

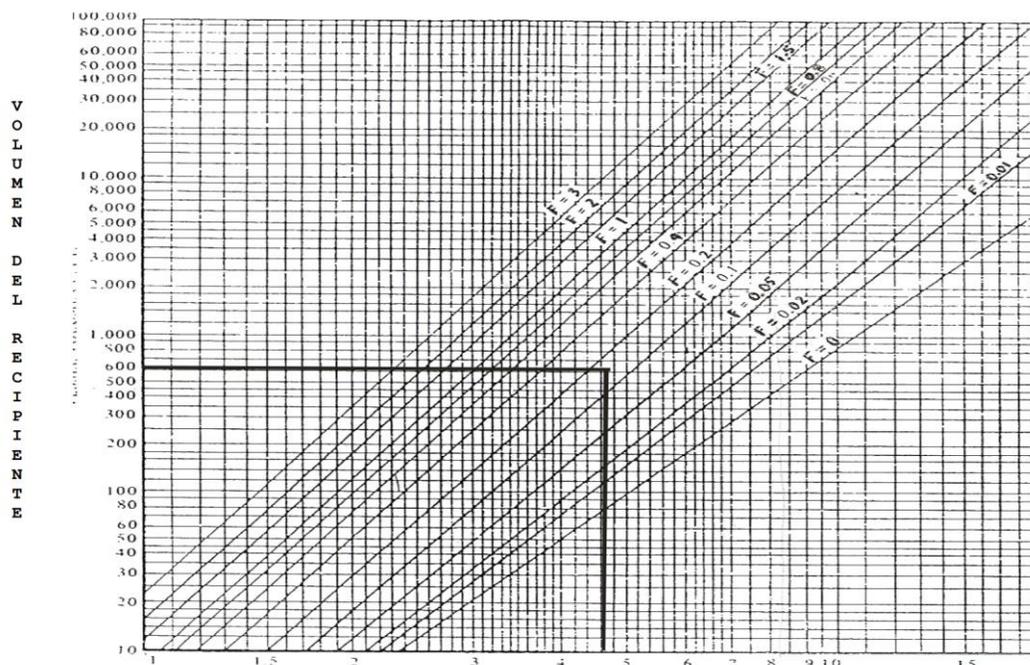
Donde P es la presión de diseño, que se establece en 60 psi, C es la corrosión máxima permitida [in], S es el valor del esfuerzo del material [psi] y E es la eficiencia de la soldadura, con el uso de los valores empleados en (Mantilla & Casallas, 2015), se obtiene:

$$F = \frac{60 \text{ psi}}{\left(\frac{1}{24}\right) \cdot 50 \cdot 10^3 \text{ psi} \cdot 0.7} = 0.4114 \quad (1.21)$$

A continuación, se determina el volumen de trabajo del tanque de agua y se utiliza el valor de F obtenido dentro de la gráfica mostrada en Figura 6 para determinar el diámetro óptimo del tanque.

### Figura 6

Gráfico para determinar el diámetro del tanque en función del volumen y el coeficiente F



Nota: Tomado de *Diseño de un tanque de almacenamiento de agua caliente sanitaria, utilizando materiales de bajo costo*, por Mantilla y Casallas, 2015.

De acuerdo a la gráfica anterior se obtiene el valor del diámetro para el tanque con el cual se calcula la longitud que debe tener en función a la siguiente expresión:

$$L = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (1.22)$$

Mediante el uso de estas expresiones se realiza el diseño del tanque a ser utilizado dentro de la simulación, al igual que su dinámica durante la carga y descarga de potencia cuyo comportamiento se verá reflejado en el cambio de la temperatura al interior del tanque.

### ***Almacenador eléctrico***

En el estudio e implementación de microrredes, uno de los componentes principales son los acumuladores, definidos como elementos capaces ya sea de guardar o entregar energía en la medida que el controlador central lo estime conveniente. Para microrredes basadas en generación de energía eléctrica es común el uso de acumuladores electroquímicos reversibles, que toman el nombre de bancos de baterías (Severino, 2011).

Una batería está formada por varias células de energía agrupadas de modo que formen un conjunto capaz de cumplir con los requisitos de potencia eléctrica demandados por el sistema que tiene que alimentar (Porrás, 2018). Estas células son conocidas como celdas y están conectadas en serie o paralelo, la celda es considerada como la unidad básica de una batería, la cual es capaz de convertir la energía química en energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas (Quintero, Che, Ching, Auciello, & de Obaldía, 2021). Producto de esta reacción se realiza el intercambio de electrones entre un cátodo y un ánodo, con lo cual se consigue un flujo y como consecuencia energía eléctrica.

Los elementos básicos que debe tener una batería se describen a continuación:

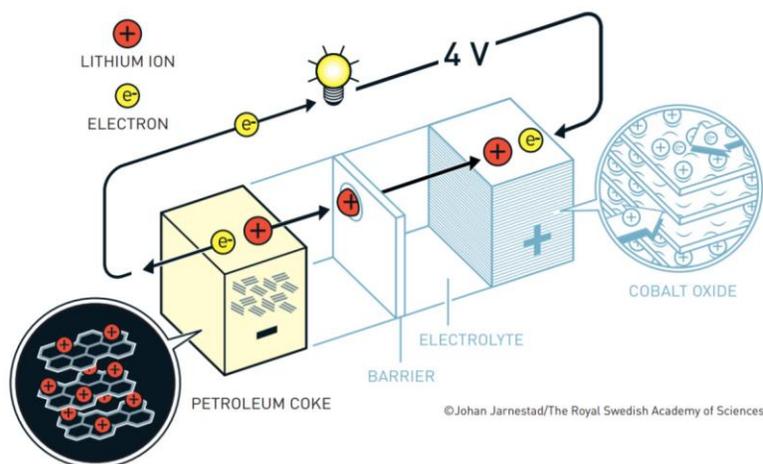
- **Ánodo:** También llamado electrodo negativo, es donde alguna sustancia se desprende de electrones, a esta reacción de pérdida de electrones se la conoce como una reacción de oxidación.

- **Cátodo:** También llamado electrodo positivo, es donde alguna sustancia acepta electrones, a esta reacción de captura de electrones se la conoce como reducción, la cual es la reacción inversa a la oxidación.
- **Electrolito:** Actúa como separador entre el cátodo y el ánodo, es utilizado para mantener el equilibrio entre las cargas. Si los electrones fluyen de ánodo a cátodo, se produce una diferencia de potencial que frena el flujo de electrones. El electrolito debe proporcionar una buena conductividad de iones y al mismo tiempo evitar la autodescarga.
- **Aislante:** Es el elemento que aísla los dos polos de la celda, para evitar la autodescarga.

Estos elementos y su interacción entre ellos se pueden observar en Figura 7.

### Figura 7

#### *Elementos de una batería*



Nota: Tomado de *Litium-Ion Batteries*, por Goodenough y Yoshino, 2019, <https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-chemistryprize2019.pdf>.

Existen varios tipos de baterías que pueden ser utilizadas dentro de un sistema encargado de la generación de energía. Sin embargo, para el presente trabajo se emplean baterías de ion litio. Este tipo de baterías son conocidas por tener una alta densidad de energía, un buen rendimiento a altas temperaturas y su posibilidad de ser reciclables. Sus ventajas radican en tener un bajo efecto de memoria, una alta potencia específica (W/kg), una elevada energía específica (Wh/kg) y una larga vida útil (Iglesias, y otros, 2021), lo que permite utilizar un menor número de celdas, conexiones o cables a diferencia de otro tipo de batería.

Los principales inconvenientes de este tipo de baterías son que, debido a la naturaleza de las reacciones químicas del litio, estas baterías no toleran sobrecargas o sobredescargas y pueden dañarse fácilmente si la estrategia de control no es la adecuada. Además, debido a la alta reactividad del litio presenta mayores restricciones de seguridad tanto para su uso como transporte. En Tabla 3 se muestran las características de las baterías de litio en comparación con las baterías de plomo ácido (Anuphapparadorn, Sukchai, Sirisamphanwong, & Ketjoy, 2014) con el fin de establecer una comparación entre ambas y justificar con ello el uso de baterías de ion litio en el presente trabajo.

**Tabla 3**

*Características de las baterías de ion-litio y plomo ácido*

<b>Características</b>	<b>Plomo ácido</b>	<b>Ion Litio</b>
Densidad de energía [Wh/L]	54 – 95	250 – 360
Energía específica [Wh/kg]	30 – 40	110 – 175
Profundidad de descarga (DOD)	50%	80%

Rango de temperatura de carga	-40°C – 27°C	-20°C – 55°C
Eficiencia	75%	97%
Periodo de tiempo de reemplazo (años)	1.5 – 2	5 – 7
Costos de mantenimiento	SLA = 2% VRLA = 10%	Ninguno
Costo de la batería [\$/kWh]	120	600

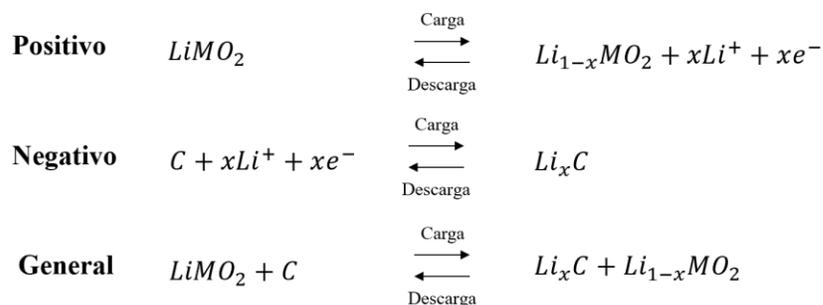
---

Nota: Tomado de *Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application*, por Anuphappharadorn, Sirisamphanwong y Ketjoy, 2014.

Debido a los factores de reactividad y seguridad antes mencionados, las baterías de litio no poseen este metal en su interior, por lo que se utilizan aleaciones que permiten el intercambio de iones de litio y de esta forma la batería no necesita usar una reacción redox. Por lo general el ánodo es un compuesto de carbono como el grafito, mientras que el cátodo es un óxido de litio que tiene la forma  $\text{LiMO}_2$  donde M puede Co, Mn, Ni o una combinación de estos con otros metales (Iglesias, et al., 2021). Durante la descarga la reacción química hace que los iones de litio se disocien en el cátodo y migren hacia el ánodo con el electrolito como medio, y al mismo tiempo para compensar la reacción los electrones viajan por el circuito externo hacia el ánodo. En Figura 8 se observa la reacción química producida en el interior de una celda de ion litio, lo que le permite tener características como las mostradas en Tabla 3.

### Figura 8

Reacción química de una batería de ion litio

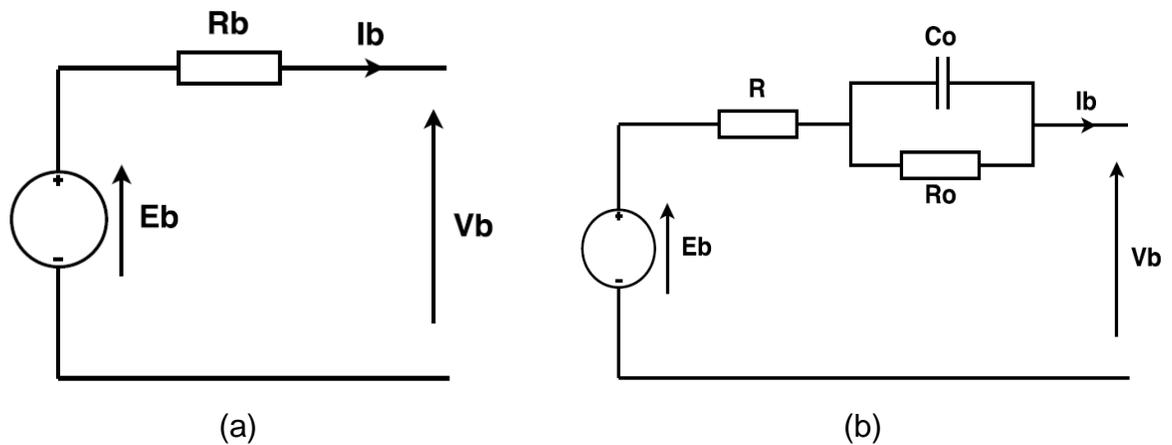


Nota: Adaptado de *Modelización matemática de una batería de uso espacial*, por Porras, 2018.

Existen varios modelos que permiten representar el comportamiento de una batería, los más utilizados corresponden a los modelos electroquímicos y los eléctricos. Los primeros se basan en los fenómenos electroquímicos al interior de la batería para predecir la energía que la batería puede almacenar y proporcionar. Sin embargo, no toman en cuenta la variación del voltaje de salida en la carga, la temperatura y las derivas por envejecimiento (Iglesias, et al., 2021). En cambio, la segunda categoría de modelos busca definir un sistema eléctrico que se comporte como una batería a través de lo que se conoce como circuitos equivalentes, el más simple es el modelo lineal Figura 9 (a) que consiste en una fuente ideal con un voltaje de circuito abierto y una resistencia en serie que representa la resistencia interna de la batería. Otro de los modelos más utilizados es el llamado modelo equivalente de Thevenin Figura 9 (b) el cual a partir del modelo lineal se incluye una resistencia ( $R_o$ ) y un capacitor ( $C_o$ ) en paralelo, esta nueva resistencia representa la resistencia no lineal entre los electrodos y el electrolito, mientras que el capacitor modela la capacidad en los electrodos de las celdas que componen la batería.

**Figura 9**

Modelo eléctrico de una batería: a) Modelo lineal, b) Modelo equivalente de Thevenin



Nota: Tomado de *Sistemas de almacenamiento de energía a partir de banco de baterías para la integración de fuentes de energía renovables en microrredes en DC*, por López J., 2015.

Para el caso del presente trabajo la representación del modelo de la batería se realizará con la estimación del estado de carga (SOC) de la batería, de modo que pueda observarse el nivel de energía y su comportamiento frente a eventos de carga y descarga de acuerdo al control propuesto dentro del EMS y de igual forma utilizar los valores del SOC para establecer restricciones o referencias de uso que permitan utilizar la batería dentro de condiciones seguras. El modelo matemático utilizado para la simulación del estimador de SOC está basado en el utilizado en (Arcos, et al., 2017), donde la cantidad de energía almacenada puede ser estimada por la siguiente expresión:

$$SOC(n) = SOC(n-1) - \Delta SOC(n) \quad (1.23)$$

Donde  $\Delta SOC(n)$  es la variación del SOC de la batería, en porcentaje, durante el periodo de muestreo  $T_s$ . Esta variación de SOC a su vez puede ser estimada mediante

el uso de la definición general de la evolución de la energía  $\Delta E_i$  de una potencia variable  $P_i$  a lo largo del periodo de tiempo  $\Delta T$ .

$$\Delta E_i(t) = \int_t^{t+\Delta T} P_i(\tau) d\tau \quad (1.24)$$

$$\Delta SOC(n) = \frac{100}{C_{BAT}} \cdot \int_{(n-1)T_s}^{nT_s} \eta \cdot P_{BAT}(\tau) d\tau \quad (1.25)$$

$$\Delta SOC(n) = \frac{100}{C_{BAT}} \cdot \eta \cdot P_{BAT}(n-1) \cdot T_s \quad (1.26)$$

Donde  $C_{BAT}$  es la capacidad nominal de la batería [kWh], y  $\eta$  es la eficiencia de la batería, la cual es diferente para los procesos de carga y descarga, de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\eta = \begin{cases} 1/\eta_D & \forall P_{BAT} > 0 \\ \eta_C & \forall P_{BAT} < 0 \end{cases} \quad (1.27)$$

Donde  $\eta_D$  y  $\eta_C$  son las eficiencias de carga y descarga de la batería, respectivamente.

### Capítulo III. Generación de Perfil de Consumo y Obtención de Datos Meteorológicos

#### Perfil de Consumo de Potencia para una Comunidad Aislada del Ecuador

La comunidad aislada seleccionada para el presente trabajo se encuentra ubicada en la provincia de Santa Elena, una de las 24 provincias del Ecuador ubicada al occidente del país, en la zona conocida como región litoral, como se observa en Figura 10. Su capital es la ciudad de Santa Elena y su parroquia más grande y poblada es La Libertad. La provincia tiene una extensión de 3 696 km<sup>2</sup> ubicándose como la tercera provincia más pequeña del país. Limita al norte con la provincia de Manabí, al este con Guayas, y al oeste y sur con el Océano Pacífico a lo largo de una franja marítima de 150 km. De acuerdo al censo de 2010 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) tiene una población de 308 693 habitantes con una proyección para el año 2020 de 401 178 habitantes.

#### Figura 10

*Ubicación geográfica de Santa Elena en Ecuador*



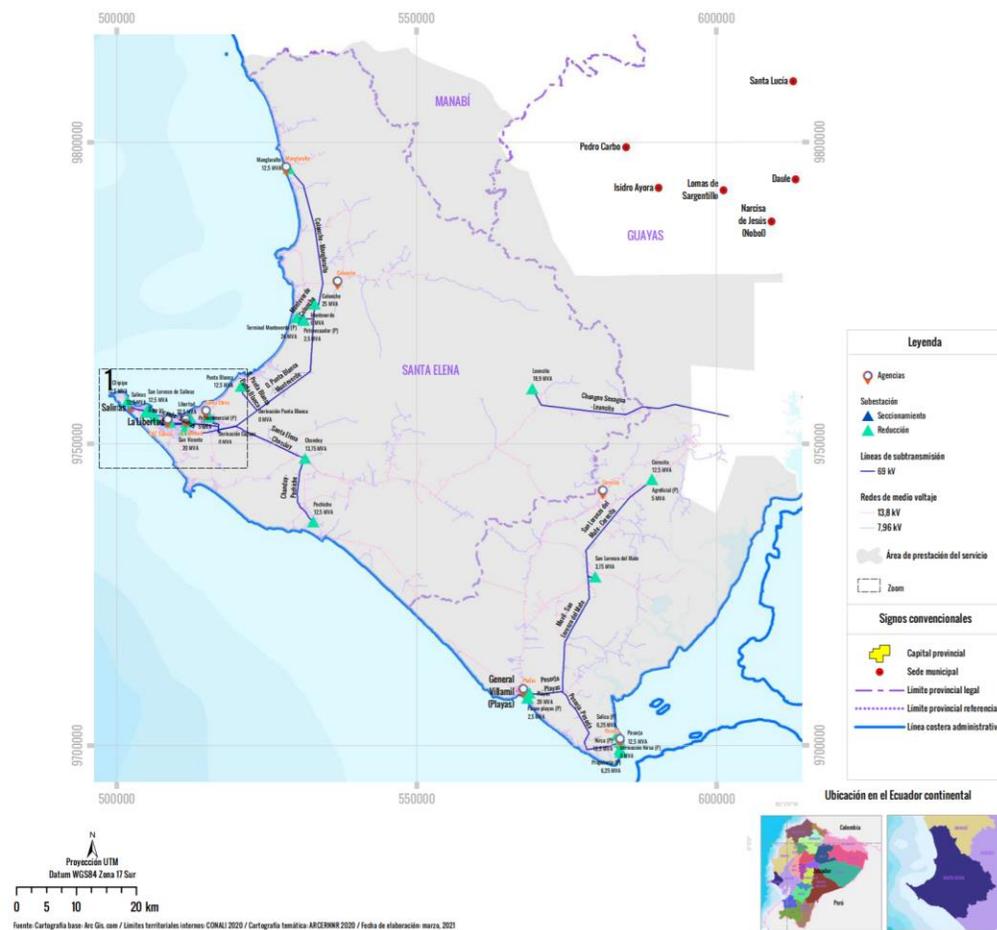
Nota: Tomado de *Provincia de Santa Elena*, por Wikipedia, 2022, [https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia\\_de\\_Santa\\_Elena](https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_Santa_Elena).

La provincia de Santa Elena presenta una de las cifras más bajas de cobertura del servicio eléctrico en el Ecuador la cual para el año 2018 fue de 88.37% (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2018), y de acuerdo a datos de (INEC, 2010) la cantidad de habitantes sin acceso al servicio eléctrico para el año 2010 fue de 8 911.

En la superficie del Ecuador se encuentran divididas 20 áreas de prestación del servicio público de energía eléctrica, de estas 11 áreas están asignadas a las Unidades de Negocio de la Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad (CNEL EP) y 9 a las empresas eléctricas. En Santa Elena la unidad encargada de proveer de energía eléctrica es el CNEL EP Unidad de Negocio Santa Elena el cual tiene un área de prestación de 6 487.26 km<sup>2</sup> de la cual 57% corresponde a la provincia de Santa Elena, el 14.9% a Guayas y el 3% a localidades de la provincia de Manabí (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020), en base a lo que se puede observar en Figura 11.

Figura 11

## Infraestructura eléctrica de CNEL EP Unidad de Negocio Santa Elena



Nota: Tomado de *Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano*, por Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales, 2020.

Dentro de la provincia se ubica una parroquia que pueda ser representada como comunidad aislada para el presente trabajo, se utiliza para ello la Figura 11 y se selecciona una ubicación donde las líneas de distribución de las empresas públicas de energía eléctrica no tengan un buen alcance. Se escoge la parroquia de Rio Verde (Latitud: -2.3108, Longitud: -80.7038) (Figura 12), de acuerdo a (Alvarado, 2019) el área comprendida entre las comunas de Rio Verde y Juan Montalvo presenta una radiación solar de 12 horas, la cual es mucho más que en otras zonas peninsulares del país, por



hombres y el 49.2% corresponden a mujeres, donde un gran porcentaje tiene el estado civil de casados (40.3%). De la población económicamente activa el 29.1% trabajan por cuenta propia, mientras que el 28% es empleado privado. El 77% de los habitantes de Santa Elena tienen una vivienda de tipo casa o villa, por lo cual se estima que dentro de sus casas posean varios tipos electrodomésticos que son utilizados diariamente. Finalmente, para el año 2010 el porcentaje de personas con acceso al servicio eléctrico público fue del 88% con lo cual un total de 8 911 habitantes estuvieron sin acceso al mismo.

En base a estos datos en Tabla 4 se plantea un conjunto de aparatos que consumen energía eléctrica que son utilizados dentro de una vivienda en donde la potencia consumida por cada uno es tomada de los datos recogidos en (Merchán, 2021).

**Tabla 4**

*Cargas propuestas para la vivienda*

Carga	P [W]
Bombillas Led	11
Refrigerador	400
Licuadaora	450
Televisor	200
Decodificador DIRECTV	28
Cargador de Celular	6
Radio/Equipo de sonido	120
Plancha	1500

Nota: Adaptado de *Rentabilidad de la implementación de paneles fotovoltaicos en relación con el consumo promedio por vivienda en las 4 regiones naturales del Ecuador*, por Merchán, 2021.

### ***Simulación de consumo para una residencia***

Dentro de la parroquia de Rio Verde habitan 1 281 personas en un total de 336 hogares con un promedio de 3.81 personas por vivienda, de acuerdo a estos datos y los presentados en la sección anterior, se procede a la simulación de consumo de una residencia. Para ello se propone el consumo semanal de cada uno de los aparatos presentados en Tabla 4 para una vivienda de una pareja con un hijo, donde ambos trabajan de lunes a viernes en un horario de 7:00 am a 18:00 pm, y se toma en cuenta que los datos son tomados cada hora durante una semana completa. En Tabla 5 se observa la cantidad de aparatos, el consumo de cada uno, las horas y días de utilización, así como el consumo diario y semanal en [Wh]. Adicionalmente en Anexo A1 se muestran los aparatos utilizados desglosados por días y horas, y en Anexo A2 se presenta el valor en potencia que supone el uso de estos aparatos durante estos periodos de tiempo.

**Tabla 5**

*Consumo semanal para una vivienda en una comunidad aislada*

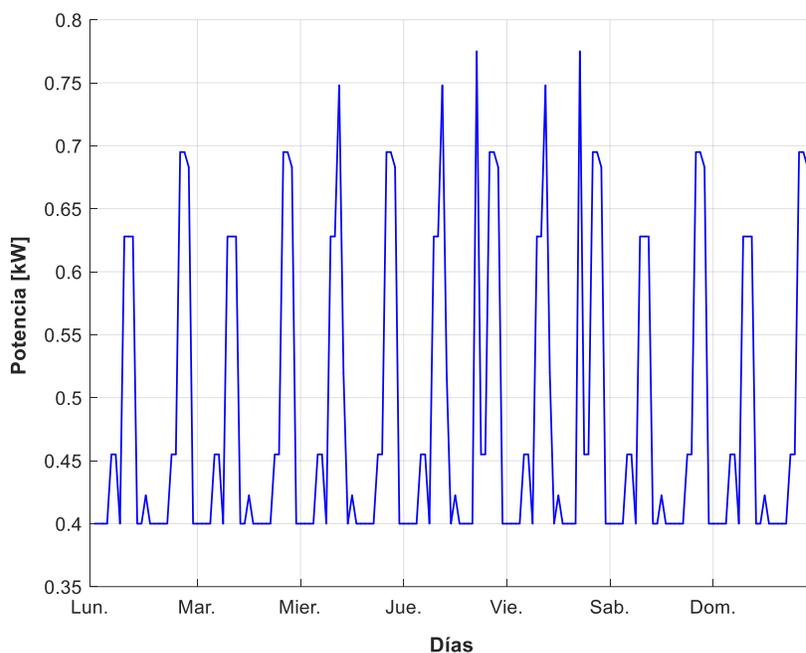
<b>Carga</b>	<b>Cantidad</b>	<b>P [W]</b>	<b>Tiempo de operación [h]</b>	<b>Días de operación</b>	<b>Consumo diario [Wh]</b>	<b>Consumo semanal [Wh]</b>
Bombillas Led	5	11	7	7	385	2695
Refrigerador	1	400	24	7	9600	67200
Licuada	1	450	0.05	7	22.5	157.5
Televisor	2	200	3	7	1200	8400
Decodificador DIRECTV	2	28	3	7	168	1176
Cargador de Celular	2	6	2	7	24	168
Radio/Equipo de sonido	1	120	2	3	240	720

Plancha	1	1500	0.25	2	375	750
Total [kWh]					12 014	81 266

A partir de la estimación de consumo de una semana se determina el perfil de consumo para todo un año. En Figura 13 puede observarse el valor total de potencia consumida dentro de la vivienda para una semana de acuerdo a los datos presentados anteriormente.

**Figura 13**

*Consumo semanal propuesto para una vivienda*



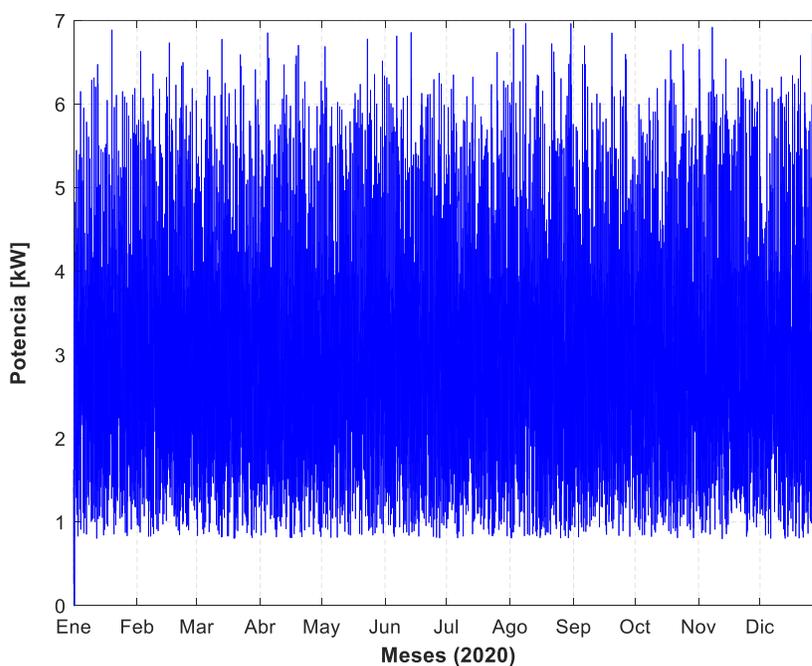
### ***Generación del perfil de consumo***

La generación del perfil de consumo anual, la cual será utilizada como entrada para la simulación del sistema de generación híbrido, se obtiene a partir de la estimación de una semana para una vivienda mostrada en la sección anterior. El perfil de consumo es generado para cada semana hasta completar un año, donde se

incorpora la suma de valores aleatorios que permitan imitar un consumo real para una vivienda. Dentro de la generación se toma en cuenta que los datos serán obtenidos cada hora durante todos los días que conforman el año 2020, además se supondrá un consumo para una comunidad conformada por 8 viviendas iguales. En total se obtienen 8 784 datos tomados desde el 01 de enero a las 00:00 hasta el 31 de diciembre de 2020 a las 23:00. En Figura 14 se muestra el perfil de consumo generado para el periodo de tiempo de estudio.

**Figura 14**

*Perfil de consumo anual*



El perfil generado presenta una potencia mínima de consumo de 0.8 kW y máxima de 6.96 kW, un consumo total de 26.96 MW durante todo el año con un promedio de consumo por hora y por día de 3.069 kW y 73.666 kW, respectivamente. En Tabla 6 se resumen estos datos para cada uno de los meses.

**Tabla 6***Datos de consumo por mes*

<b>Mes</b>	<b>Consumo promedio por hora [kW]</b>	<b>Consumo promedio por día [kW]</b>	<b>Consumo total [MW]</b>
Enero	3.0078	73.1863	2.2378
Febrero	3.2152	74.5045	2.1606
Marzo	3.0443	73.0623	2.2649
Abril	3.0124	72.2965	2.1689
Mayo	3.1057	74.5372	2.3107
Junio	3.1059	74.5423	2.2363
Julio	3.0382	72.9165	2.2604
Agosto	3.0998	74.3943	2.3062
Septiembre	3.0825	73.98	2.2194
Octubre	3.0376	72.9018	2.26
Noviembre	3.1217	74.9217	2.2477
Diciembre	3.0769	73.8455	2.2892

**Datos Meteorológicos de la Zona**

Los datos meteorológicos son tomados de la localidad de Rio Verde en la provincia de Santa Elena escogida para este estudio, cuyas coordenadas son: Latitud = -2.3108 y Longitud: -80.7038. Estos datos son adquiridos de la plataforma web Solcast, la cual es una herramienta usada para planificar, construir, operar y administrar sistemas de energía solar en todo el mundo. La plataforma permite a investigadores acceder a datos tanto de irradiación solar, velocidad del viento, temperatura y otros, necesarios dentro de proyectos que involucran el uso de energías renovables. Los datos que ofrece la plataforma pueden ser en tiempo real o pronostico, así como datos

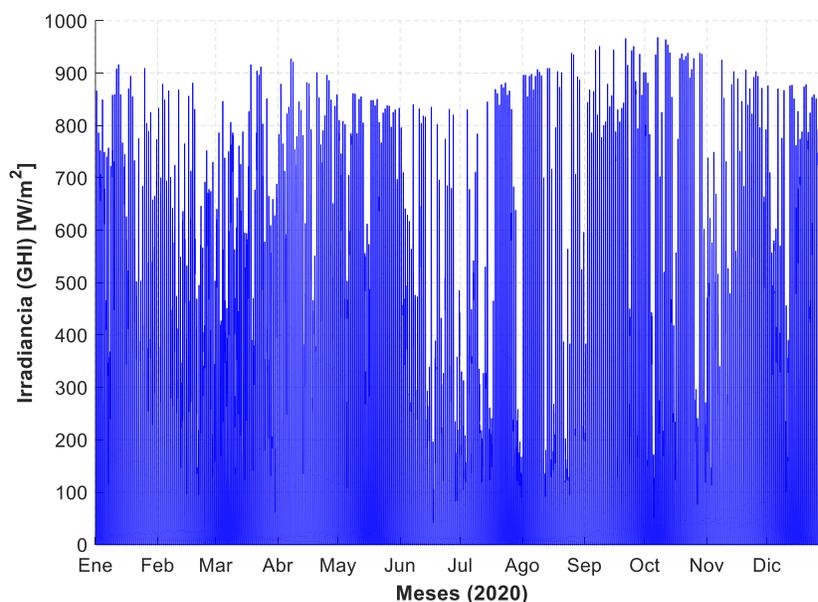
históricos de años anteriores. Este último conjunto de datos será utilizado dentro del presente trabajo para obtener valores de irradiación solar y temperatura de cada hora durante el año 2020 de acuerdo a las fechas utilizadas para la generación del perfil de consumo.

### ***Irradiación solar***

Los datos tomados de la plataforma corresponden a la Irradiancia Horizontal Global (GHI), la cual es la irradiancia total recibida en una superficie horizontal y es definida como la suma de los componentes de irradiancia directa (DNI) y difusa (DIF) medidos en unidades de  $W/m^2$ . Los datos obtenidos para el año 2020 se muestran en Figura 15.

**Figura 15**

*Irradiación solar Río Verde año 2020*



En Tabla 7 se presentan los datos de irradiación solar por mes para la localidad, donde se menciona que el valor máximo de irradiación alcanzado fue de  $968 W/m^2$ , el

mes con mayor irradiación fue Mayo, mientras que Julio fue el mes con menor irradiación.

**Tabla 7**

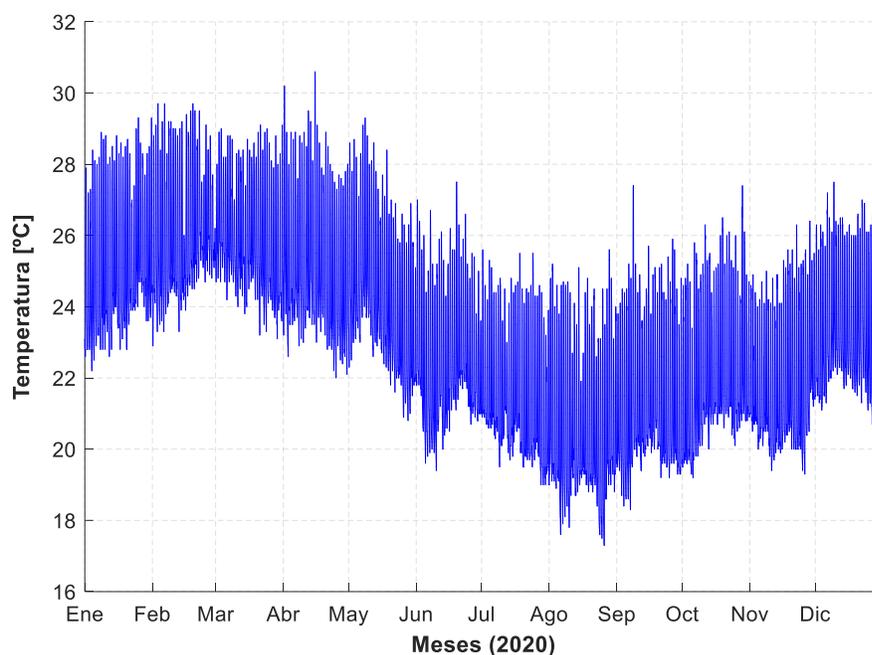
*Datos de irradiación solar de los meses de 2020*

<b>Mes</b>	<b>Irradiación promedio por hora [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Irradiación promedio por día [kW/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Irradiación total [kW/m<sup>2</sup>]</b>
Enero	215.9597	5.183	160.674
Febrero	189.0565	4.3809	127.046
Marzo	191.0013	4.584	142.105
Abril	225.1931	5.4046	162.139
Mayo	224.8172	5.3956	167.264
Junio	165.3514	3.9684	119.053
Julio	155.3683	3.7288	115.594
Agosto	194.9556	4.6789	145.047
Septiembre	211.0444	5.0651	151.952
Octubre	199.0726	4.7777	148.110
Noviembre	204.9292	4.9183	147.549
Diciembre	211.5	5.076	157.356

### ***Temperatura ambiente***

Los datos tomados de la plataforma corresponden a la temperatura del aire de la localidad medidos a 2 metros sobre el nivel del suelo en unidades de grados Celsius.

Los datos obtenidos de temperatura para el año 2020 se muestran en Figura 16.

**Figura 16***Temperatura ambiente Río Verde año 2020*

En Tabla 8 se presentan los datos de temperatura ambiente por mes para la localidad, donde se menciona que el valor máximo de temperatura alcanzado fue de 30.6 °C y valor mínimo fue de 17.3 °C, el mes con mayor temperatura promedio registrada fue Febrero (26.96 °C), mientras que Agosto fue el mes con menor temperatura (20.6 °C).

**Tabla 8***Datos de temperatura de los meses de 2020*

Mes	Temperatura promedio por hora [°C]
Enero	25.216
Febrero	26.9662
Marzo	25.8813

Abril	25.1704
Mayo	24.3132
Junio	22.491
Julio	24.4776
Agosto	20.6
Septiembre	21.3224
Octubre	22.0769
Noviembre	21.7971
Diciembre	23.3894

---

## Capítulo IV. Diseño de Algoritmos y Estrategias de Gestión de Energía

### Diseño del Algoritmo para la Determinación de Velocidad de Giro Óptima del Generador a Diésel

El principal objetivo del diseño de un algoritmo de control de velocidad de un generador a diésel dentro de su uso en un sistema de generación híbrido, es la reducción en primera instancia del consumo de combustible, lo cual implica una reducción de los costos asociados al mismo, así como las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente. Estos son los factores principales que buscan ser reducidos mediante la implementación del algoritmo.

De acuerdo a (Morales, 2010) los sistemas convencionales de generación diésel son poco eficientes con un elevado costo de mantenimiento cuando son utilizados para alimentar cargas que están por debajo de la nominal. Esto es debido a un fenómeno conocido como *wetstacking* que consiste en la acumulación de residuos en las cámaras debido a una combustión incompleta. La operación óptima de este tipo de generadores se logra a través de convertirlos en sistemas operados a velocidad variable lo cual como consecuencia genera un ahorro significativo de combustible en comparación con el uso de generadores a velocidad constante. Además, al utilizar este tipo de configuración se consigue reducir el peso y tamaño de un generador para abastecer una misma capacidad de potencia, dado que el generador puede operar a velocidades por encima de la nominal. Otro aspecto importante es que al ser utilizado para alimentar cargas por debajo de la nominal se consigue aumentar la vida útil del motor.

El diseño del algoritmo de control parte de la determinación del consumo de combustible, dado que es el factor que se busca reducir dentro de la operación normal del generador a diésel. El consumo se obtiene a partir del parámetro conocido como Consumo Especifico de Combustible (BSFC) [g/kWh], el cual está definido como la

medida de la eficiencia del combustible en el motor para producir potencia en el eje (Jiménez & Rivas, 2018). Este valor se utiliza para comparar la eficiencia del combustible entre diferentes motores y puede ser obtenida con la siguiente expresión:

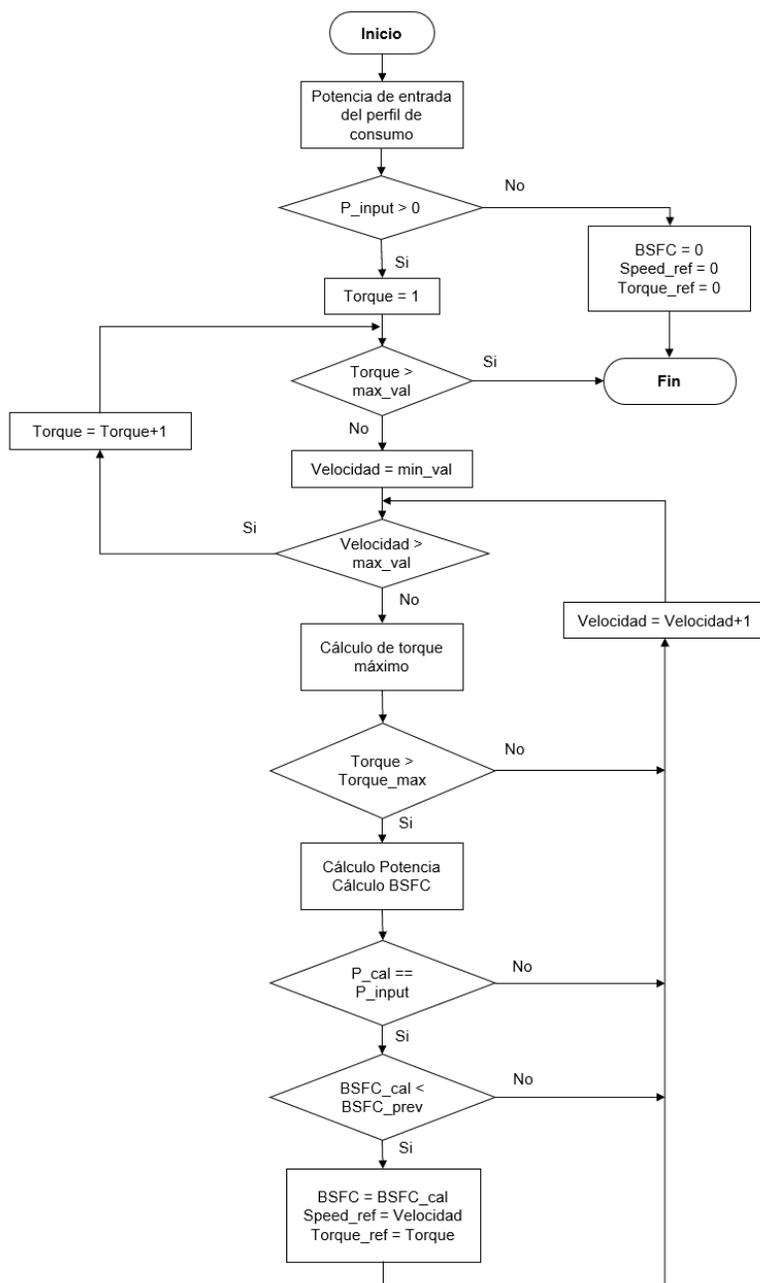
$$BSFC = \frac{1}{\eta_r \cdot Q_{HV}} \quad (3.1)$$

Donde  $\eta_r$  es la eficiencia de salida del motor diésel y  $Q_{HV}$  es el valor menor de calentamiento para el combustible, el cual está definido en tablas en base al tipo de combustible. De forma adicional este valor puede ser obtenido de las curvas específicas provistas por el fabricante del generador en las cuales se muestra la relación entre torque [Nm], velocidad [rpm] y consumo [g/kWh].

El algoritmo utilizado tiene como finalidad establecer una referencia de velocidad para un determinado motor a diésel acoplado a un generador de acuerdo a las consideraciones presentadas en Capítulo II. La finalidad es que el consumo de combustible sea el menor posible y de esta forma pueda adaptarse a las necesidades de potencia dentro de la comunidad propuesta. Adicionalmente, del algoritmo se obtiene una referencia de torque de modo que se pueda realizar el cálculo de potencia generada por el generador a diésel utilizado para cada caso. En Figura 17 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo a implementar el cual está basado en el trabajo de (Jiménez & Rivas, 2018) y en Anexo B se muestra el código elaborado en Matlab utilizado en la simulación.

Figura 17

Diagrama de flujo para el cálculo de la velocidad óptima y consumo del motor



Nota: Adaptado de *Modelado y simulación de un sistema de generación de energía eléctrica a base de diésel*, por Jiménez y Rivas, 2018.

El diseño de una estrategia de control para un motor diésel que permita encontrar la velocidad óptima de giro con un consumo de combustible a partir de una carga eléctrica dada, necesita previamente determinar la relación entre velocidad y potencia (Paredes, 2009). Esta relación puede ser deducida a partir de las curvas de torque-velocidad-consumo de la máquina. Como se puede observar en Figura 17 el algoritmo genera una matriz con valores de BSFC en función de los rangos de torque y velocidad especificados para cada tipo de motor, al mismo tiempo que intenta no exceder el valor de torque máximo (Torque\_max) [Nm] en cada iteración. Este valor de torque determina los límites en el cálculo de BSFC, y es obtenido mediante el uso de la regresión cuadrática que relaciona las variables de torque y velocidad angular de la curva, mediante el cálculo de tres coeficientes (A, B y C) de acuerdo al siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned} \sum x^4 \cdot A + \sum x^3 \cdot B + \sum x^2 \cdot C &= \sum x^2 y \\ \sum x^3 \cdot A + \sum x^2 \cdot B + \sum x \cdot C &= \sum xy \\ \sum x^2 \cdot A + \sum x \cdot B + N \cdot C &= \sum y \end{aligned} \quad (3.2)$$

Donde  $x$  son los valores de velocidad,  $y$  son los valores de torque y  $N$  es el número de datos utilizados para el cálculo de regresión, el sistema de ecuaciones da como resultado los tres coeficientes necesarios para generar la siguiente expresión:

$$\tau = A \cdot \omega^2 + B \cdot \omega - C \quad (3.3)$$

Donde  $\tau$  es el torque [Nm] y  $\omega$  es la velocidad angular [rpm]. Por su parte la determinación de BSFC (BSFC\_cal) [g/kWh] se realiza mediante una regresión cuadrática multivariable que relaciona los valores de velocidad angular, torque y BSFC, en base a la siguiente expresión:

$$BSFC = f(\tau, \omega) \quad (3.4)$$

Los datos para los cálculos de regresión son tomados de la curva característica de cada motor y son procesados en Matlab mediante la herramienta de *Curve Fitting* en la cual se cargan los tres vectores de datos y se configura para obtener los coeficientes que forman parte de la siguiente expresión:

$$BSFC = a_1 + a_2 \cdot \omega + a_3 \cdot \tau + a_4 \cdot \omega^2 + a_5 \cdot \omega \cdot \tau + a_6 \cdot \tau^2 \quad (3.5)$$

El valor de potencia ( $P_{cal}$ ) [kW] es calculado en cada iteración mediante la siguiente expresión:

$$P_{cal} = \tau_i \cdot \omega_j \cdot \frac{\pi}{30} \quad (3.6)$$

Donde  $\tau_i$  y  $\omega_j$  son los valores de torque y velocidad, respectivamente, para cada una de las iteraciones realizadas por el algoritmo. La potencia calculada es comparada con la potencia proveniente del perfil de consumo, en caso de ser iguales se almacenan los valores de BSFC y velocidad angular correspondientes. El algoritmo continúa con el cálculo hasta completar el rango de torque y velocidad proporcionados, en cada ciclo el valor de consumo es comparado con el anterior de modo que permita determinar el menor consumo de combustible para una potencia de referencia dada. El proceso para el cálculo de los coeficientes de las expresiones utilizadas dentro del algoritmo es presentado en Anexo C, donde se observa el cálculo para el motor a diésel Kubota RT140. Sin embargo, se menciona que para las simulaciones correspondientes se utilizan tres motores diferentes de modo que se ajusten a las necesidades de la carga.

### **Consumo de combustible y emisiones de CO2**

Una vez calculado el valor de BSFC para cada valor de potencia, se determina la cantidad de combustible ( $C_i$ ) [gal] necesaria para suplir el valor de la carga respectiva, de acuerdo a la siguiente expresión (Jiménez & Rivas, 2018):

$$C_i = 0.26417 \cdot BSFC_i \cdot P_i \cdot h \cdot \frac{1}{\rho_{diesel}} \quad (3.7)$$

Donde  $P_i$  es el valor de potencia que debe generarse [kW],  $h$  es el tiempo que el generador supe potencia a la carga [horas], y  $\rho_{diesel}$  es la densidad del diesel [kg/m<sup>3</sup>] (832 kg/m<sup>3</sup>). El consumo total de combustible ( $C_T$ ) [gal] para todo el periodo de estudio se obtiene de la suma de todos los valores de  $C_i$ .

Finalmente, para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> de una determinada máquina o actividad industrial, se utiliza el término conocido como factores de emisión, los cuales permiten determinar las emisiones en función de la cantidad de combustible empleado. De acuerdo al Panel Intergubernamental de Científicos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Haro & Oscullo , 2016), los factores de emisión de CO<sub>2</sub> para cada tipo de combustible se presentan en Tabla 9.

**Tabla 9**

*Factores de emisión de CO<sub>2</sub>*

<b>Tipo de combustible</b>	<b>Factor de Emisiones de CO<sub>2</sub> [ton CO<sub>2</sub>/gal]</b>
Diesel	10.0x10 <sup>-3</sup>
Fuel Oil	10.9 x10 <sup>-3</sup>
Gas natural	5.288 x10 <sup>-5</sup>
Residuo	9.6 x10 <sup>-3</sup>

Nota: Tomado de *Factor Anual de Emisión de CO<sub>2</sub> Producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, Mediante la Aplicación de la Metodología de la Convención Marco Sobre el Cambio Climático UNFCCC*, por Haro y Oscullo, 2016.

De este modo el cálculo de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> [ton CO<sub>2</sub>] producto del uso de un generador a diésel se obtiene de la siguiente expresión:

$$CO_{2_{emisiones}} = 10.0 \times 10^{-3} \cdot C_T \quad (3.8)$$

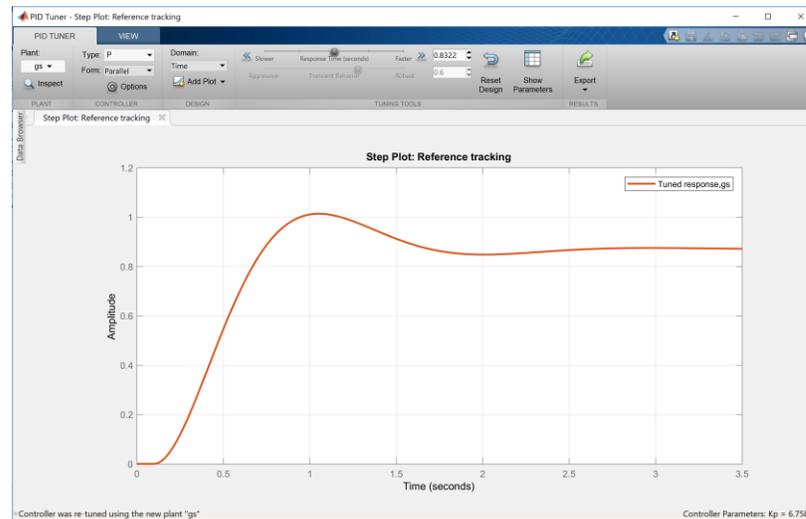
### **Controlador**

De acuerdo al esquema presentado en Figura 2 se requiere de un bloque que sirva de controlador de la planta de forma que permita el seguimiento de la referencia de velocidad calculada por el algoritmo presentado. La función de transferencia correspondiente al motor diésel corresponde a un sistema de segundo orden con un retardo correspondiente al tiempo de combustión, por lo cual se realiza el diseño de un controlador que permita el seguimiento a referencia para este tipo de planta.

Dentro de este apartado se diseñan tres tipos de controladores: PID, PI y PID Tipo C o de dos grados de libertad, con el fin de obtener el mejor desempeño en cuanto a los parámetros de sobreimpulso y tiempo de establecimiento. Los tres tipos de control son sintonizados mediante la herramienta de *PID Tuner* proporcionada por Matlab, cuya interfaz se muestra en Figura 18, en donde se selecciona el tipo de control y se sintoniza de manera manual hasta obtener un desempeño que permita la respuesta a cambios repentinos de velocidad.

**Figura 18**

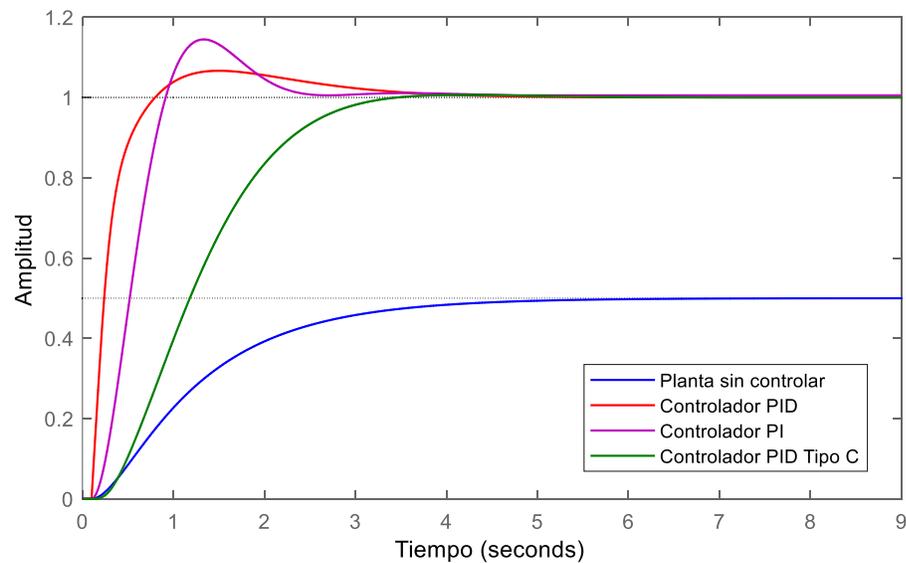
*Interfaz PID Tuner de Matlab*



Las respuestas de los controladores sintonizados a un escalón unitario se presentan en Figura 19, y los valores de los parámetros de desempeño se resumen en Tabla 10.

**Figura 19**

*Comparación controladores*



**Tabla 10***Parámetros de desempeño de controladores*

<b>Parámetro</b>	<b>PID</b>	<b>PI</b>	<b>PID Tipo C</b>
Tiempo de subida [s]	0.4	0.553	0.999
Tiempo de establecimiento [s]	3.13	2.24	2.22
Sobreimpulso [%]	6.65	14.5	0.00167
Amplitud pico	1.07	1.14	1

Como se observa, mediante la evaluación de los tres controladores se obtiene un tiempo de establecimiento similar que permite una respuesta rápida de la planta. Sin embargo, el valor de sobreimpulso varía significativamente en cada uno de los controladores, donde el control PID Tipo C es el que presenta un valor cercano a cero. En base a los resultados arrojados por el estudio realizado se selecciona este último controlador para ser utilizado dentro de las simulaciones del presente trabajo, que involucren el uso de un generador diésel. Dado que el controlador no presenta un sobreimpulso elevado, evita posibles riesgos de exceder valores máximos o mínimos de operación del motor acoplado al generador. Además, el uso de este tipo de controladores conlleva un gasto energético mínimo durante los cambios de referencia, en comparación con controladores convencionales. Las especificaciones de ganancia del controlador serán detalladas en el Capítulo V.

## Diseño de Estrategia de Gestión de Energía Basada en Control Heurístico

### *Almacenador eléctrico*

De forma general, dentro del sistema de generación híbrido, las potencias involucradas en la operación del mismo pueden ser expresadas de la siguiente forma:

$$P_{LG} = P_{LOAD} - P_{GEN} \quad (3.9)$$

$$P_{GEN} = P_{PV} \quad (3.10)$$

$$P_{DG} = P_{LG} - P_{BAT} \quad (3.11)$$

Donde  $P_{LG}$  es la potencia de la red,  $P_{LOAD}$  es la potencia de la carga,  $P_{GEN}$  es la potencia de generación renovable,  $P_{PV}$  es la potencia fotovoltaica,  $P_{BAT}$  es la potencia de la batería y  $P_{DG}$  es la potencia del generador a diésel que se necesita para suplir las necesidades de consumo de la comunidad. Las expresiones están basadas en la publicación de (Arcos-Aviles, Pascual, Marroyo, Sanchis, & Guinjoan, 2016) donde se realiza el estudio sobre un sistema para una residencia conectado a la red eléctrica. No obstante, para el presente trabajo al representar un sistema aislado se realiza la inclusión de un generador a diésel que permita abastecer de potencia a la carga cuando la potencia de generación renovable y de la batería no son suficientes.

Para el caso particular de la batería, en el cual está centrado el control del EMS para gestionar la carga y descarga, se toma en cuenta que la misma depende directamente del SOC, el cual debe mantenerse entre unos límites mínimo y máximo, con el fin de preservar el tiempo de vida de la batería. De acuerdo a (Jiang, y otros, 2014), el uso de baterías en el rango de SOC medio, por ejemplo, entre 20% y 80%, exhiben una estabilidad superior en la retención de su capacidad a lo largo del número

de ciclos de carga/descarga, en comparación a aquellas baterías que trabajan en los dos rangos finales opuestos. De este modo el SOC de la batería debe cumplir con:

$$SOC_{\min} \leq SOC(n) \leq SOC_{\max} \quad (3.12)$$

Donde

$$SOC_{\min} = (1 - DOD) \cdot SOC_{\max} \quad (3.13)$$

Donde DOD es la profundidad de descarga, la cual depende del tipo de batería que se use dentro del sistema como se observa en las características presentadas en Tabla 3 del Capítulo II. El objetivo de la estrategia de control del EMS es evitar que la batería sea cargada o descargada fuera de los límites considerados seguros, por lo que el control deberá desconectar la potencia entregada o absorbida por la batería en estos casos.

La primera estrategia de control propuesta está basada en el control heurístico, el cual tiene la característica de no precisar de un modelo matemático de la planta para su utilización por lo que resulta flexible y versátil de diseñar e implementar. De acuerdo a (Huang & Cheok, 2007) este control está basado en la aplicación de reglas empíricas, conjeturas fundamentales, juicios intuitivos o el sentido común para establecer criterios de control sobre una determinada planta. Actualmente las técnicas de control heurístico son utilizadas en el campo de la ingeniería en conjunto con algoritmos de inteligencia artificial y estrategias de búsqueda inteligente para resolver problemas de control en lo que se conoce como control heurístico óptimo.

Para la estrategia de control del presente trabajo, se utiliza la heurística dentro de su definición que se encuentra más apegada al de un conjunto de reglas, por lo que se realizan estrategias en base a información de fácil acceso o en este caso, en base a

la observación del comportamiento de la planta. Esa información es utilizada con el fin de gestionar los procesos de carga y descarga de la batería en base a las condiciones mencionadas anteriormente.

De este modo el sistema propuesto usa un EMS que debe cumplir con lo siguiente:

$$P_{DG} = \begin{cases} P_{LG} - P_{BAT} & , \quad \forall SOC = SOC_{\max} \\ P_{LG} & , \quad \forall SOC \leq SOC_{\min} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$P_{BAT} = \begin{cases} P_{LG} & , \quad \forall P_{LG} \geq 0 \wedge SOC = SOC_{\max} \\ P_{LG} + P_{DGres} & , \quad \forall P_{LG} < 0 \wedge SOC \leq SOC_{\min} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$0 \leq P_{BATdes} \leq P_{BATmax} \quad (3.16)$$

Donde  $P_{DGres}$  es la potencia residual del generador a diésel producida debido a la inclusión de una condición mínima de funcionamiento,  $P_{BATdes}$  es la potencia de descarga de la batería y  $P_{BATmax}$  es la potencia máxima impuesta para la descarga. De este modo se observa que la batería contribuye a disminuir la potencia de generación a diésel cuando el SOC haya alcanzado su valor máximo y es desconectada cuando el mismo haya alcanzado su valor mínimo. Así la batería se encuentra constantemente en procesos de carga y descarga dentro de los límites seguros para el tipo de batería utilizada.

Las ecuaciones 4.15 y 4.16 establecen las reglas que gestionan la cantidad de potencia que absorbe o entrega la batería en base al nivel del SOC, donde se puede mencionar que la potencia residual del generador a diésel es incluida dentro del proceso de carga de la batería. Esto es realizado con el fin de reducir la energía residual total del sistema e incrementar la capacidad del aporte de potencia de la batería en periodos de

tiempo en los que la potencia de generación renovable no sea suficiente para abastecer a las cargas.

### **Almacenamiento térmico**

El caso del almacenamiento térmico a través de un tanque de agua caliente que se encuentra dentro del sistema, sigue los mismos principios de diseño empleados para el almacenador eléctrico. La expresión que representa el flujo de potencia y el cálculo de temperatura dentro del tanque presentadas en el Capítulo II, se muestran nuevamente a continuación:

$$Q_{ST}(n) = Q_{WH}(n) - Q_{LOSS}(n) - Q_{DHW}(n) \quad (3.17)$$

$$T_{WD}(n) = T_{WD}(n-1) + \frac{T_s}{\rho_w \cdot C_p \cdot V} \cdot [Q_{WH}(n) - Q_{LOSS}(n) - Q_{DHW}(n)] \quad (3.18)$$

Como se puede observar la temperatura al interior del tanque depende directamente las potencias involucradas en la carga y descarga del mismo. De esta forma el control aplicado a este almacenador tiene la función de desconectar la potencia cuando la temperatura alcance un valor máximo, y por otro lado volver a conectar la potencia cuando la temperatura llegue a un valor mínimo. El EMS propuesto para el sistema deberá cumplir con lo siguiente:

$$Q_{ST} = \begin{cases} -Q_{WH} - Q_{LOSS} - Q_{DHW} & , \quad \forall T_{WD} \leq T_{\min} \\ -Q_{LOSS} - Q_{DHW} & , \quad \forall T_{WD} = T_{\max} \end{cases} \quad (3.19)$$

Donde

$$Q_{WH} = P_{LOAD} - P_{GEN} - P_{DG} - P_{BAT} \quad (3.20)$$

$$Q_{WH} \leq 0 \quad (3.21)$$

Donde  $T_{\min}$  y  $T_{\max}$  son los valores límites de temperatura en los cuales debe operar el tanque, de este modo al igual que sucedía en el almacenador eléctrico la temperatura del tanque aumenta y disminuye dentro de los límites propuestos. El valor de  $Q_{WH}$  corresponde en este caso a lo que se conoce como balance de potencia de todo el sistema, por lo cual representa la potencia residual total obtenida de la operación del sistema.

El valor del balance tendrá signo positivo cuando las potencias de generación del sistema no sean suficiente para abastecer a la carga, y por el contrario tendrá signo negativo cuando estas excedan la potencia necesaria en la carga. Convirtiéndose en potencia residual que será utilizada por el almacenador térmico, lo que explica el empleo de un signo negativo en el valor de  $Q_{WH}$  en la ecuación 4.19. Por otro lado, el valor de  $Q_{DWH}$  corresponderá a un perfil de consumo generado de forma similar al presentado en Capítulo III, con el cual se simula el consumo de agua caliente del interior del tanque por parte de la comunidad en estudio.

### **Diseño de Estrategia de Gestión de Energía Basada en el Control por Lógica Difusa (FLC)**

#### ***Control basado en lógica difusa (FLC)***

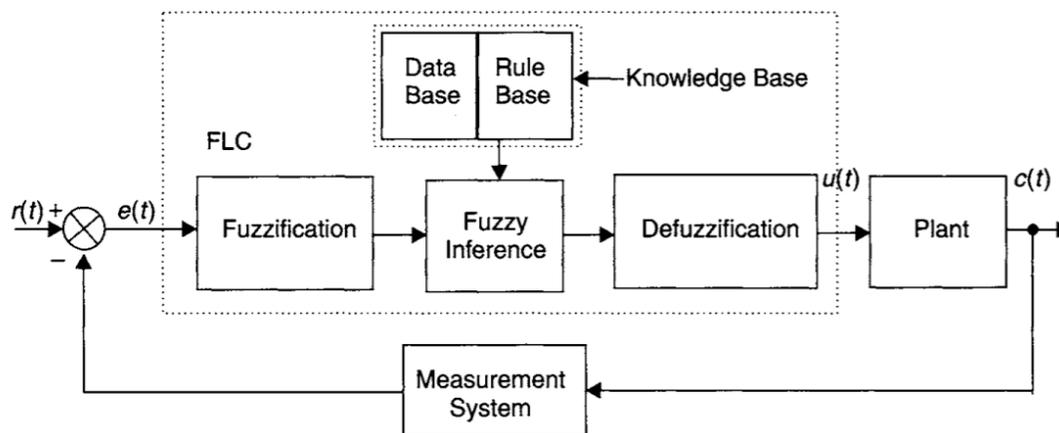
La segunda estrategia de control propuesta para el EMS es el control basado en lógica difusa, mediante el cual se debe gestionar los procesos de carga y descarga de la batería con las mismas condiciones descritas en la sección anterior, dado que de igual forma estará condicionado a mantenerse entre los límites seguros de SOC. Este control está basado en la teoría de conjuntos difusos para modelar un tipo de incertidumbre asociado con la imprecisión o carencia de información (Burns, 2001).

El concepto central de la teoría se basa en que las funciones de membresía al igual que en la teoría de probabilidad pueden tomar valores entre 0 y 1, y son

generalmente representadas por triángulos. Para el presente diseño se utiliza el modelo difuso de Mamdani en el cual tanto las entradas como las salidas son de tipo difuso, por lo cual para el diseño de un control se requieren de tres procesos: fusificación, en el cual se mapean las entradas en valores de pertenencia de conjuntos difusos en los diversos universos de discurso; inferencia difusa, en el cual a partir de un conjunto de reglas basadas en conocimiento a priori se obtiene un vector de salidas difusas. Y defusificación, proceso en el cual se mapean las señales de control difuso inferidas dentro de una ventana de salida a una señal de control no difusa que pueda ser utilizada de forma práctica, el método utilizado generalmente es el conocido como centro de área. En Figura 20 se presenta la estructura básica de un control basado en lógica difusa para el modelo de Mamdani, de acuerdo a lo descrito anteriormente.

**Figura 20**

*Estructura básica de un control FLC*



Nota: Tomada de *Advanced Control Engineering*, por Burns, 2001.

### **Diagrama de bloques de control**

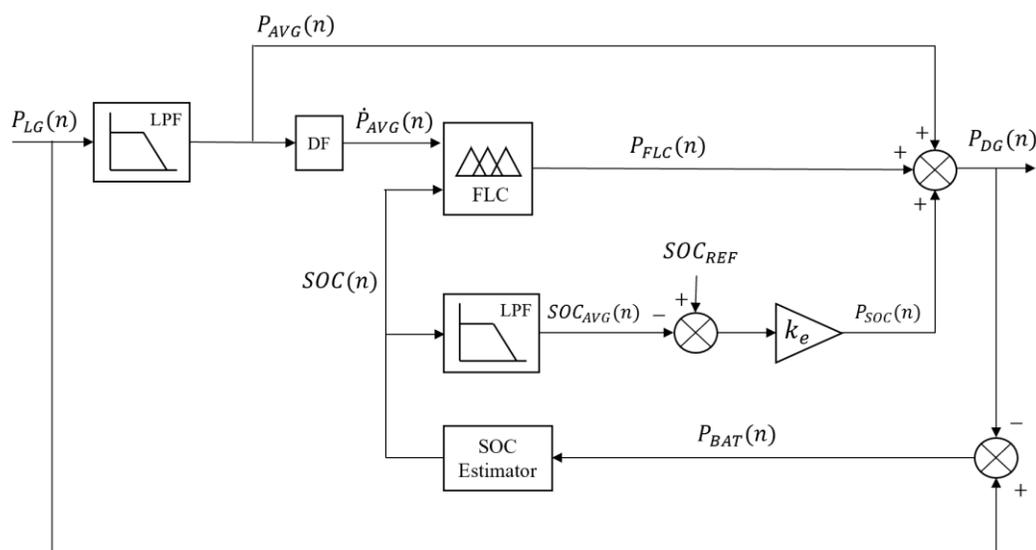
La estrategia de control fuzzy para el EMS está basada en la tasa de cambio de la energía de la diferencia entre la potencia de la carga y la de generación renovable,  $P_{LG}$ . Esta estrategia está basada en los trabajos de (Arcos-Aviles, Pascual, Marroyo,

Sanchis, & Guinjoan, 2016) y (Arcos, et al., 2017) para minimizar los picos de potencia y fluctuaciones en perfil de potencia de la red, al mismo tiempo que mantiene el SOC dentro de límites seguros y reduce la complejidad del control fuzzy. En base a estas características se propone una estrategia de control que busque conseguir estos beneficios enfocados en el funcionamiento del generador a diésel, que constituye la fuente de generación adicional para el sistema aislado propuesto.

El diagrama de bloques del EMS propuesto se muestra en Figura 21 y está compuesto por los siguientes bloques: un bloque de filtro pasa bajos (LPF) usado para calcular el valor promedio de las 24 horas previas; un bloque de filtro digital (DF) usado para obtener la magnitud del cambio de energía del sistema de dos muestras consecutivas; un bloque estimador de SOC de la batería implementado mediante las expresiones del modelo matemático presentado en Capítulo II. Y un bloque para el control difuso (FLC) usado para mejorar el perfil de potencia del generador a diésel en base al SOC de la batería y la magnitud de cambio de energía.

**Figura 21**

*Diagrama de bloques de la estrategia para el EMS basado en control Fuzzy*



Nota: Adaptada de *Low complexity energy management strategy for grid profile smoothing of a residential grid-connected microgrid using generation and demand forecasting*, por Arcos, et al., 2017.

El perfil de potencia para el generador diésel, de acuerdo a la estrategia propuesta estará compuesto por la suma de tres elementos, en base a la siguiente expresión:

$$P_{DG}(n) = P_{AVG}(n) + P_{SOC}(n) + P_{FLC}(n) \quad (3.22)$$

Donde  $P_{AVG}$  es la potencia promedio de  $P_{LG}$  de las últimas 24 horas,  $P_{FLC}$  es la potencia de salida del bloque FLC, y  $P_{SOC}$  es la salida del lazo de control de la batería.

El primer componente,  $P_{AVG}$ , es obtenido del resultado de aplicar un filtro pasa bajos a los valores de potencia  $P_{LG}$  para calcular el valor promedio de las últimas 24 horas. Este filtro es aplicado para separar las altas frecuencias de las bajas, de este modo el generador a diésel generará potencia a bajas frecuencias lo que evita que se produzcan cambios abruptos de la referencia para conseguir un perfil más suavizado. La forma en la que se realiza el filtro pasa bajos es a partir de la aplicación un filtro de mediana móvil simple (SMA) con una ventana de 24 horas, la cual elimina las fluctuaciones diarias del perfil de potencia de baja frecuencia (Pascual, Sanchis, & Marroyo, 2014), la expresión utilizada dentro del bloque se muestra a continuación:

$$P_{AVG}(n) = \frac{1}{M_{24}} \sum_{k=1}^{M_{24}} P_{LG}(n-k) \quad (3.23)$$

Donde  $M_{24}$  es el número de muestras en 24 horas.

El segundo componente,  $P_{SOC}$ , es utilizado debido a que las perdidas en la batería, sin ningún control adicional, hacen que el generador a diésel no pueda

suministrar la energía real que necesita el sistema por lo que agota el sistema de almacenamiento. A partir de este componente se mantiene el SOC de la batería cerca de un valor de referencia. Por lo tanto,  $P_{SOC}$  será proporcional al error entre el valor de referencia del SOC y del valor promedio de SOC de las últimas 24 horas, de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$P_{SOC}(n) = k_e [SOC_{REF} - SOC_{AVG}(n)] \quad (3.24)$$

Donde,

$$SOC_{AVG}(n) = \frac{1}{M_{24}} \sum_{k=1}^{M_{24}} SOC(n-k) \quad (3.25)$$

Donde  $SOC_{REF}$  es el valor de referencia de SOC,  $SOC_{AVG}$  es el valor promedio de SOC de las últimas 24 horas y  $k_e$  es la constante de ganancia proporcional, que está establecida en 0.005 kW/% para obtener un margen de fase suficientemente alto para el lazo de control de la batería (Arcos, et al., 2017).

El tercer componente,  $P_{FLC}$ , es usado para mejorar el perfil de potencia del generador a diésel de acuerdo al valor estimado de SOC de la batería,  $SOC(n)$ , y la magnitud de la variación de energía del sistema,  $\dot{P}_{AVG}(n)$ , definido como la primera diferencia hacia atrás de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\dot{P}_{AVG}(n) = \frac{P_{AVG}(n) - P_{AVG}(n-1)}{T_s} \quad (3.26)$$

La entrada correspondiente a  $SOC(n)$  es utilizada para ajustar el valor de potencia a las limitaciones en cuanto a la máxima profundidad de descarga de la batería utilizada y así preservar su tiempo de vida. Por otro lado, el componente de  $\dot{P}_{AVG}(n)$  al representar la derivada del valor promedio de potencia, cuando tiene una pendiente

positiva indica una reducción de la potencia de generación renovable o un incremento del consumo de la carga; y por el contrario, en el caso de una pendiente negativa indica un aumento de la potencia de generación o una reducción del consumo de la carga (Arcos-Aviles, Pascual, Marroyo, Sanchis, & Guinjoan, 2016). De este modo se puede considerar a este componente como una predicción local del comportamiento futuro del SOC de la batería en el caso de que la potencia del sistema no sea modificada. La función de  $P_{FLC}$  consistirá por lo tanto en aumentar, disminuir o mantener la potencia que deberá suministrar el generador a diésel para satisfacer la demanda de potencia en la carga y mantener el SOC de la batería dentro de límites seguros.

### ***Diseño del controlador fuzzy***

El bloque FLC presentado en Figura 21 consiste en un control basado en lógica difusa comprendido de dos entradas,  $\dot{P}_{AVG}(n)$  y SOC (n), y una salida  $P_{FLC}(n)$ . Se utiliza un modelo basado en Mamdani para la inferencia y defusicación por el método de centro de gravedad. Los parámetros del control difuso respecto al número de funciones de membresía (MF), tipo de función y base de reglas, fueron sintonizados en función de las simulaciones previas realizadas con todos los datos y perfiles relacionados a la comunidad aislada en estudio. De esta forma estos parámetros fueron ajustados hasta obtener el mejor desempeño para el EMS de modo que cumpla con los criterios planteados en secciones anteriores. Adicionalmente, se usó como referencia los parámetros utilizados en (Arcos-Aviles, Pascual, Marroyo, Sanchis, & Guinjoan, 2016) para este fin.

Como resultado se definen 5 funciones triangulares de membresía para cada una de las entradas como se muestra en Figura 22, donde se muestran cinco subconjuntos etiquetados como NB, NS, ZE, PS y PB, donde B representa “Big” (Grande), S “Small” (Pequeño), N “Negative” (Negativo), P “Positive” (Positivo) y ZE

“Zero” (Cero). Las funciones de membresía se distribuyen a lo largo de un rango de variación para cada entrada de acuerdo a:

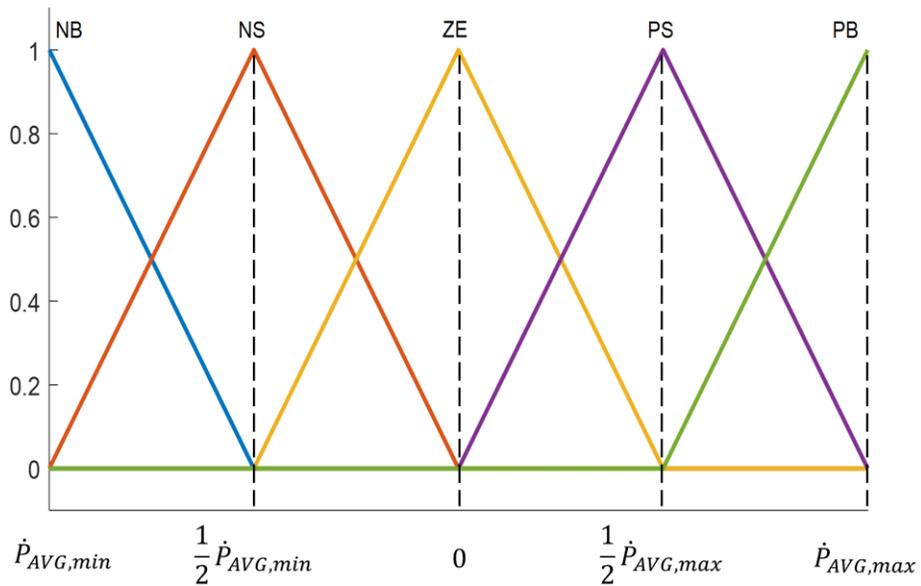
$$SOC_{\min} \leq SOC(n) \leq SOC_{\max} \quad (3.27)$$

$$\dot{P}_{AVG,\min} \leq \dot{P}_{AVG}(n) \leq \dot{P}_{AVG,\max} \quad (3.28)$$

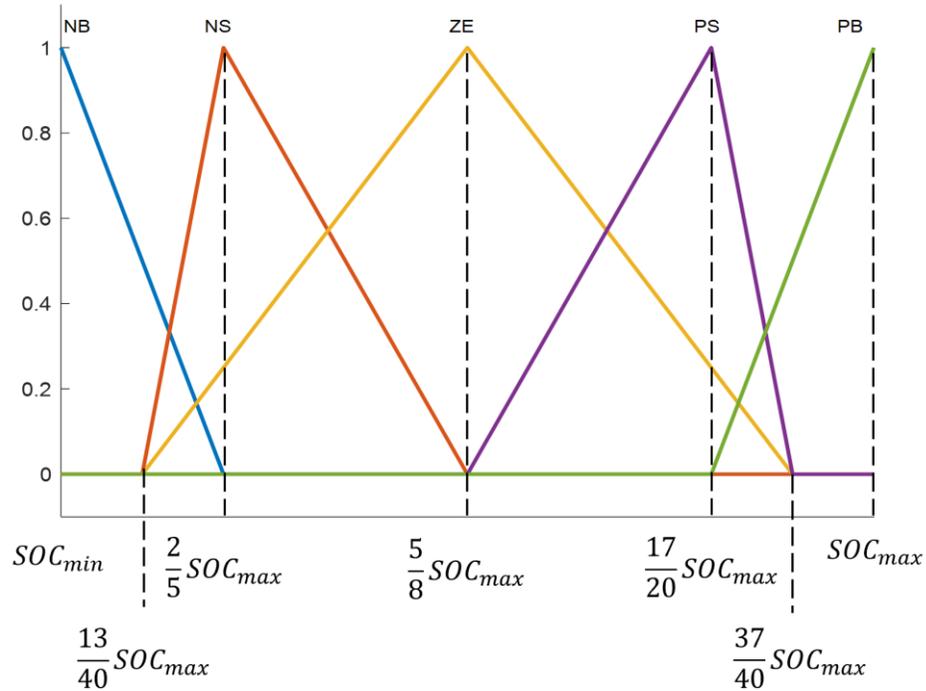
Donde  $\dot{P}_{AVG,\min}$  y  $\dot{P}_{AVG,\max}$  son los valores mínimo y máximo de la derivada, respectivamente, los cuales son determinados a partir de la simulación realizada previamente para los datos de todo el periodo de tiempo de estudio.

**Figura 22**

*Funciones de membresía para las variables de entrada (a) derivada de la potencia promedio y (b) SOC de la batería*



(a)



(b)

Nota: Basado en de *Low complexity energy management strategy for grid profile smoothing of a residential grid-connected microgrid using generation and demand forecasting*, por Arcos, et al., 2017.

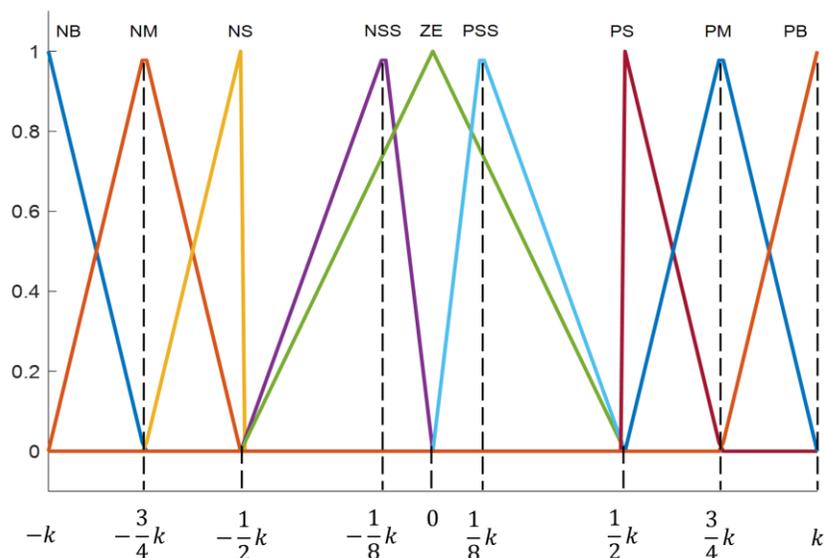
La salida del controlador, por su parte está constituida por nueve funciones de membresía triangulares, como se muestra en Figura 23. Estas funciones están asociadas a nueve subconjuntos difusos etiquetados como NB, NM, NS, NSS, ZE, PSS, PS, PM y PB, donde M es “Medium” (Medio), SS “Smallest” (Mas pequeño), el resto de letras fueron descritas previamente. Las funciones de membresía de la salida de control, al igual que las entradas, están distribuidas a lo largo del rango expresado en la siguiente expresión:

$$-k \leq P_{FLC}(n) \leq k \quad (3.29)$$

Donde k es la máxima potencia definida para la salida del controlador.

**Figura 23**

*Funciones de membresía para la salida del controlador*



Nota: Basado en de *Low complexity energy management strategy for grid profile smoothing of a residential grid-connected microgrid using generation and demand forecasting*, por Arcos, et al., 2017.

Finalmente, la base de reglas para el control difuso es elaborada a partir del conocimiento lingüístico sobre el comportamiento del sistema, las cuales fueron sintonizadas de forma que se consiga el mejor desempeño del controlador en la generación del perfil de potencia para el generador a diésel. Se generan 25 reglas que son presentadas en Tabla 11.

**Tabla 11***Base de reglas para el control difuso*

		$\dot{P}_{AVG}(n)$				
		NB	NS	ZE	PS	PB
SOC (n)	NB	PSS	PSS	PS	PM	PB
	NS	PSS	ZE	PSS	PSS	PM
	ZE	NS	NSS	ZE	PSS	PS
	PS	NSS	NS	NSS	PM	PSS
	PB	NB	NM	NSS	NSS	NSS

Del conjunto de reglas se toma el caso de ejemplo en que la tasa de cambio de la energía es grande, es decir  $\dot{P}_{AVG}(n)$  es PB, y la cantidad de energía almacenada en la batería es baja, es decir SOC (n) es NB. Por lo cual se necesita que el generador a diésel incremente la inyección de potencia para recargar la batería, y de ese modo poder utilizar la energía almacenada en el futuro, por lo tanto, de acuerdo a las reglas  $P_{FLC}(n)$  será PB. Este enunciado en forma de regla de control es:

SI  $\dot{P}_{AVG}$  es PB Y SOC es NB ENTONCES  $P_{FLC}$  es PB

Para el caso contrario en que la tasa de cambio de energía es grande y negativa ( $\dot{P}_{AVG}(n)$  es NB), lo que indica una reducción del consumo de la carga o aumento de la generación renovable, y la energía almacenada en la batería es alta (SOC (n) es PB). El generador a diésel puede reducir la inyección de potencia y de este modo se pueda utilizar la energía almacenada en la batería en su lugar, por lo que  $P_{FLC}(n)$  será NB. El enunciado en forma de regla de control es:

SI  $\dot{P}_{AVG}$  es NB Y SOC es PB ENTONCES  $P_{FLC}$  es NB

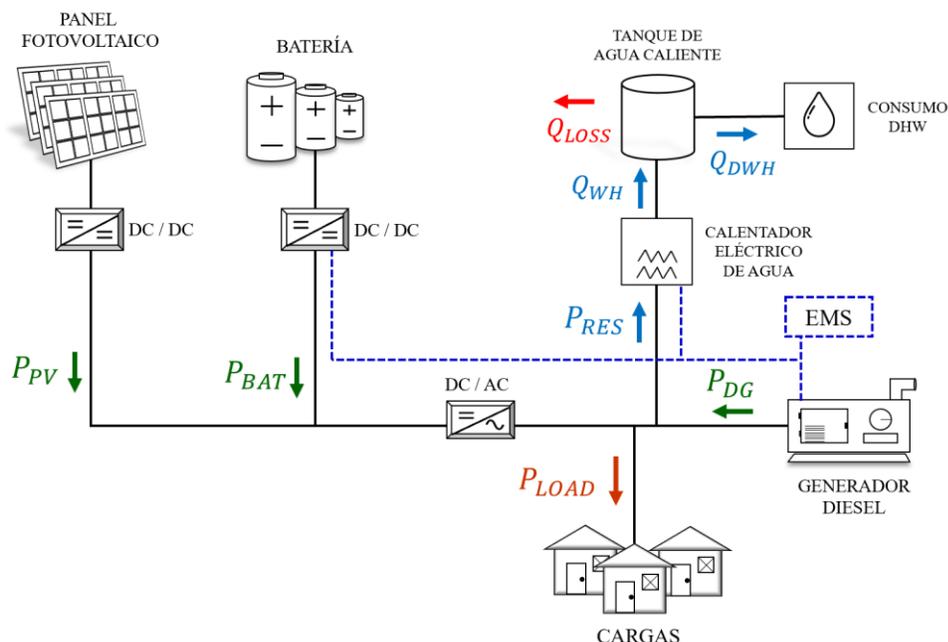
El resto de reglas de control son obtenidas con el mismo razonamiento hasta completar todas las combinaciones de los subconjuntos difusos de entrada para la variación de energía del sistema y SOC de la batería.

## Capítulo V. Simulación de Casos de Estudio

### Comparación Configuraciones del Sistema de Generación Híbrido

La primera parte de las simulaciones tiene por objetivo realizar una comparación entre dos casos de estudio para la comunidad aislada propuesta. El primer caso está centrado en la utilización únicamente de un generador a diésel, para satisfacer las necesidades de potencia de la carga, escenario que suele ser común para comunidades que no tienen acceso al servicio de electricidad pública. En el segundo caso se realiza la inclusión de un sistema de generación fotovoltaico que apoye la generación y disminuya la intervención del generador a diésel, además de un sistema de almacenamiento compuesto por un banco de baterías y un tanque de agua caliente, utilizados con el fin de aprovechar al máximo toda la potencia residual generada por el sistema.

La arquitectura del sistema de generación y almacenamiento híbrido propuesto (Caso 2) se muestra en Figura 24. De acuerdo a la figura el flujo de potencia se realiza de acuerdo a la dirección de las flechas, donde los valores de  $P_{PV}$ ,  $P_{DG}$ ,  $P_{RES}$ ,  $Q_{WH}$ ,  $Q_{DHW}$  y  $P_{LOAD}$ , son positivos; mientras que  $P_{BAT}$  es positivo para el proceso de descarga y negativo para el de carga.

**Figura 24***Arquitectura del sistema de generación y almacenamiento híbrido*

Para las simulaciones se utiliza la versión de Matlab R2017a ejecutadas en una computadora HP Spectre x360 de 16 GB de RAM con sistema operativo Windows 10 Home de 64 bits, procesador Intel Core i7-8550U CPU 1.80 GHz.

**Caso 1: Sistema solo con generador diésel**

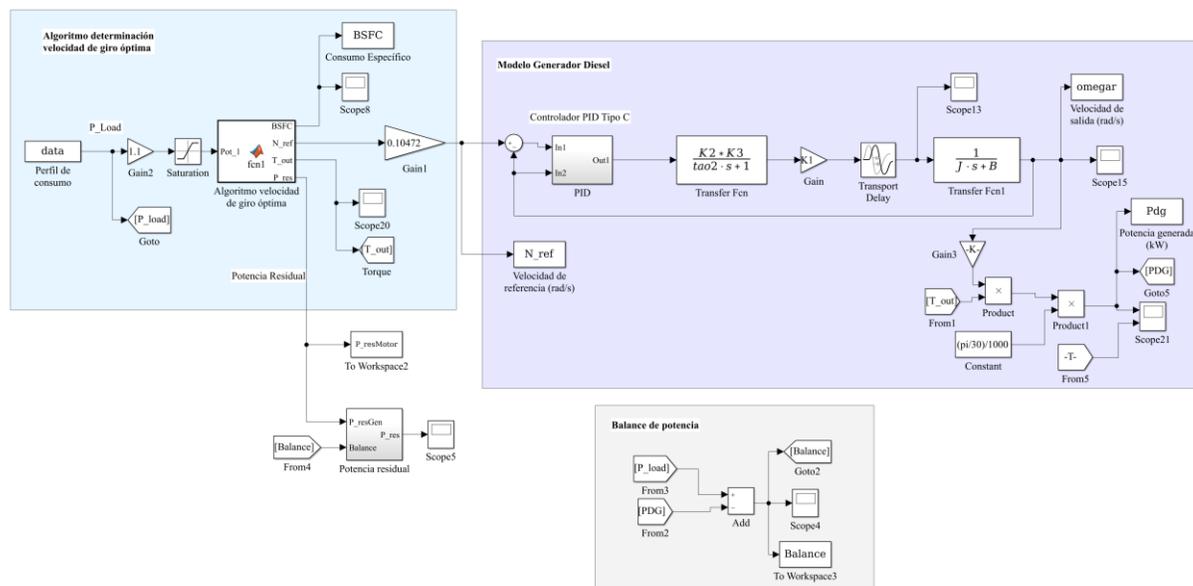
El primer caso de estudio corresponde al empleo únicamente del generador a diésel para abastecer de energía a la comunidad aislada planteada, los datos técnicos de la máquina y de generación son mostrados en Tabla 12. Este caso es utilizado como una referencia a partir de la cual se incluyen elementos adicionales con el fin de mejorar el desempeño del sistema en la generación eléctrica, al intentar disminuir el consumo de combustible, las emisiones de CO<sub>2</sub> y la potencia desperdiciada. En este primer caso se observa sobre todo el funcionamiento del algoritmo para el cálculo de la velocidad óptima del motor, utilizado como una primera forma de reducción del consumo de combustible para el motor seleccionado. Cabe mencionar que para cada uno

de los casos en estudio se utiliza un modelo de motor diferente, ajustado a las necesidades de generación para cada situación.

### Implementación en Simulink.

**Figura 25**

*Modelo del sistema de generación solo con un generador a diésel*



**Resumen de parámetros de modelos y controladores.** En las siguientes tablas se presentan los parámetros y los valores utilizados para la simulación de los modelos matemáticos y controladores descritos en capítulos anteriores.

**Tabla 12**

*Características del motor a diésel acoplado al generador*

Parámetro	Valor
Fabricante	Kubota
Modelo	RT 140 DI-ES
Numero de cilindros	1
Salida máxima [kW/rpm]	10.3 kW/2 400

Salida nominal continua [kW/rpm]	9.2 kW/2 400
Consumo específico de combustible (a salida nominal continua) [g/HP-hr]	231
Torque máximo [kg-m/rpm]	5.0/1 600
Combustible	Aceite de diésel ligero (SAE No. 2-D)

**Tabla 13**

*Parámetros del modelo matemático que definen el comportamiento del generador diésel*

Parámetro	Valor
$k_1$	1
$k_2$	1
$k_3$	1
$\tau_1$	0.1
$\tau_2$	0.2
$J$	2.5
$B$	1

**Tabla 14**

*Ganancias del controlador PID Tipo C de velocidad*

Parámetro	Valor
$K_p$	12.5902
$K_i$	8.8531
$K_d$	2.7465

**Tabla 15**

*Parámetros utilizados en el algoritmo de cálculo de velocidad óptima (Caso 1)*

Parámetro	Valor
Rango velocidad [rpm]	500 – 2400

Rango torque [Nm]	1 – 35
Potencia mínima de funcionamiento [kW]	0.8
A	$-9.9227 \times 10^{-6}$
B	0.03728
C	-2.1997
$a_1$	483.5
$a_2$	-0.3047
$a_3$	3.406
$a_4$	$4.29 \times 10^{-5}$
$a_5$	0.004041
$a_6$	-0.1676

---

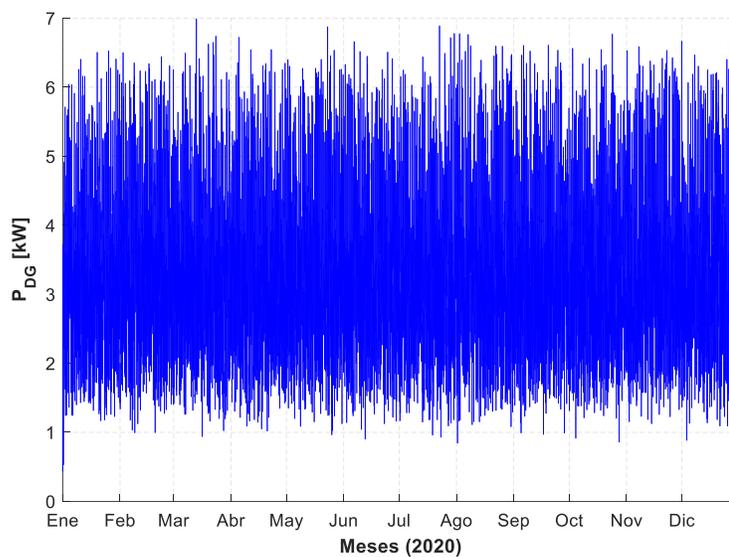
**Resultados.** La simulación del primer caso es realizada de forma que el generador a diésel pueda producir toda la potencia que necesitan las cargas, mediante la utilización del algoritmo que calcula la velocidad y torque óptimo para una potencia dada. La velocidad calculada se utiliza como referencia para el control en lazo cerrado del modelo matemático del generador que incluye la dinámica de una máquina de este tipo.

El perfil de consumo que constituye los datos de entrada al sistema es multiplicado por una ganancia del 10% para asegurar que la potencia generada siempre sea superior a la carga. En Figura 26 y Figura 27 se observan los resultados anuales para la potencia generada y la velocidad de giro del motor. Para el caso de la potencia generada se aprecia que adopta la forma del perfil de consumo mostrado en el Capítulo III con las restricciones correspondientes a la potencia mínima de funcionamiento del motor seleccionado. Por su parte la velocidad de giro muestra en primera instancia

seguir, de acuerdo al algoritmo, una velocidad alrededor de los 250 rad/s con variaciones de acuerdo a la potencia de referencia que se necesita generar en cada momento.

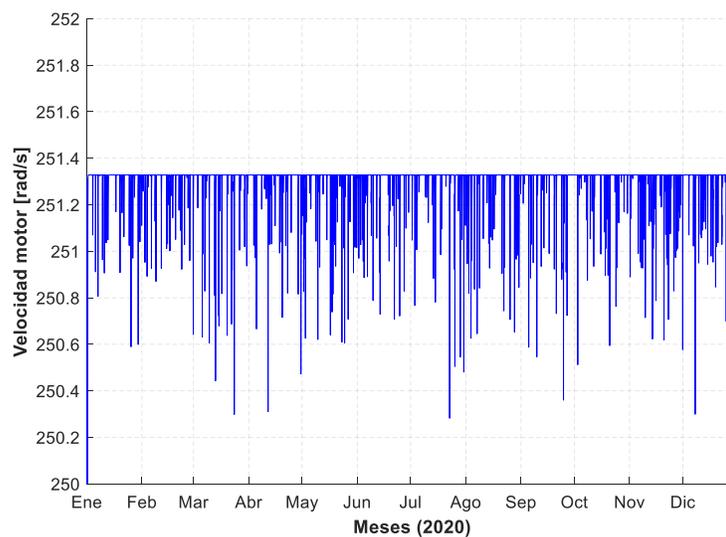
**Figura 26**

*Potencia generada por el generador a diésel (Caso 1)*



**Figura 27**

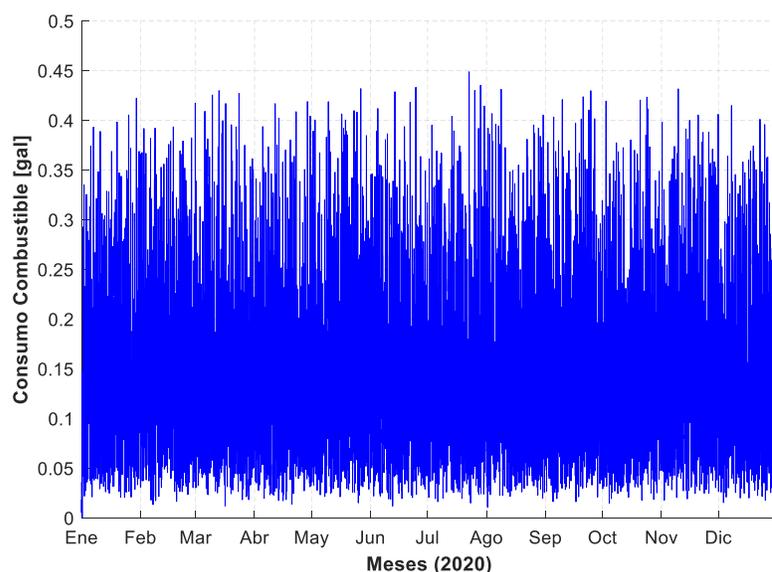
*Velocidad del motor a diésel acoplado al generador (Caso 1)*



Uno de los parámetros considerado como más importante dentro de la simulación es el consumo de combustible, el cual puede observarse en Figura 28 y es obtenido a partir de los datos de BSFC resultantes de la simulación. En la figura se puede observar el consumo para todo el año donde los meses con mayor consumo son: mayo y agosto, mientras que el mes con menor consumo es abril, se calcula un consumo anual de  $1.2518 \times 10^3$  galones. A partir de este valor de consumo medido en galones de combustible diésel se puede calcular la cantidad de emisiones producidas por el funcionamiento del generador, las cuales alcanzan el valor de 12.5183 ton CO<sub>2</sub> para todo un año de operación.

### Figura 28

*Consumo del generador en galones de diésel (Caso 1)*

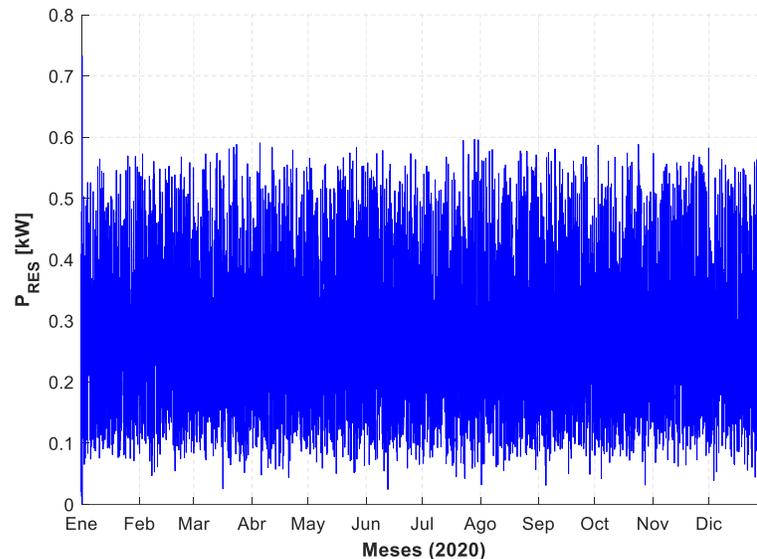


Por último, con la consideración de la potencia mínima de funcionamiento del generador que hace que los valores de potencia que se encuentren debajo de este límite generen potencia residual. Esto sumado a la potencia excedente de generación en comparación con el perfil de consumo, da como resultado la potencia residual total del sistema o también denominada como potencia desperdiciada, dado que no es

utilizada con ningún otro propósito dentro del sistema. Este perfil de potencia residual es mostrado en Figura 29 para todo el año de estudio, donde la suma del mismo da como resultado un total de 2.4065 MW de potencia desperdiciada anualmente.

**Figura 29**

*Potencia residual producto de la operación del generador a diésel*



***Caso 2: Sistema con generador diésel, panel fotovoltaico y sistema de almacenamiento térmico y eléctrico***

Con el objetivo de mejorar el desempeño con respecto al caso de referencia que utiliza únicamente un generador a diésel se realiza la inclusión de un sistema de generación fotovoltaico con las características presentadas en Tabla 18. Este sistema está configurado para obtener una potencia fotovoltaica de hasta 6.7 kW en base a la irradiación y la hora del día. La inclusión de este sistema busca generar una reducción en la utilización del generador a diésel junto con su consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, esto hace que la potencia residual generada sea mayor que la del primer caso, por lo cual se hace necesario la inclusión de un sistema

de almacenamiento que en este caso estará integrado por un almacenador eléctrico y térmico.

El segundo caso de estudio, donde se presenta el sistema de generación y almacenamiento híbrido propuesto para el presente trabajo, tiene como base de funcionamiento un EMS basado en un control heurístico para la gestión de la energía en la batería y de la temperatura en el tanque de agua. De esta forma el banco de baterías realizara los procesos de carga/descarga entre el 50% y 80% de su nivel de SOC, de modo que de acuerdo a la arquitectura propuesta se utiliza la potencia excedente producida por el sistema de generación fotovoltaico y la potencia residual del generador a diésel para su carga. Una vez que haya alcanzado su nivel máximo de SOC se descargará al inyectar potencia en el sistema de generación para apoyar al generador a diésel.

La potencia residual final obtenida del cálculo del balance de potencia es enviada hacia el almacenador térmico para ser utilizada en forma de agua caliente por parte de la comunidad, para aprovechar toda la energía generada por el sistema y evitar el desperdicio de la misma.

Implementación en Simulink.

Figura 30

Modelo del sistema de generación y almacenamiento híbrido (Parte 1)

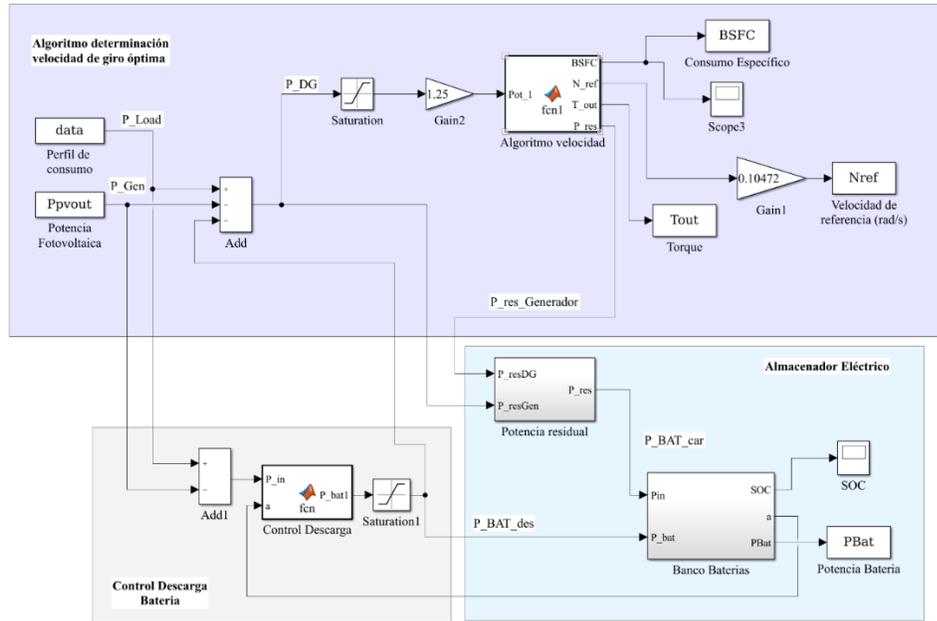
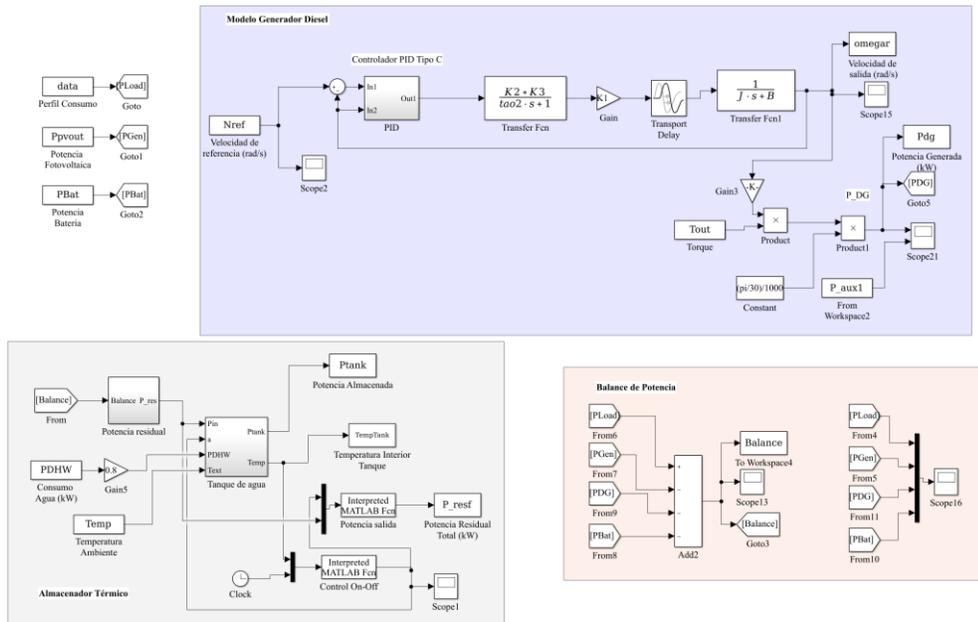


Figura 31

Modelo del sistema de generación y almacenamiento híbrido (Parte 2)



**Resumen de parámetros de modelos y controladores.** En las siguientes tablas se presentan los parámetros y los valores utilizados para la simulación de los modelos matemáticos y controladores descritos en capítulos anteriores, con excepción de aquellos parámetros presentados en el primer caso de estudio y que conservan los mismos valores para el segundo caso.

**Tabla 16**

*Características del motor a diésel acoplado al generador*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Fabricante	Kubota
Modelo	OC95-E2
Numero de cilindros	1
Salida continua [kW/rpm]	6.3 kW/3600
Salida intermitente [kW/rpm]	7.0 kW/3600
Velocidad máxima [rpm]	3600
Velocidad mínima [rpm]	1300
Torque máximo [Nm/rpm]	22.6/2000
Combustible	Combustible diésel No. 2-D

**Tabla 17**

*Parámetros utilizados en el algoritmo de cálculo de velocidad optima (Caso 2)*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Rango velocidad [rpm]	1200 – 3800
Rango torque [Nm]	1 – 24
Potencia mínima de funcionamiento [kW]	1
A	$-1.25 \times 10^{-6}$

B	$5.15 \times 10^{-3}$
C	17.22
$a_1$	77.85
$a_2$	-0.0373
$a_3$	19.64
$a_4$	$1.714 \times 10^{-5}$
$a_5$	-0.002014
$a_6$	-0.3125

**Tabla 18**

*Parámetros del sistema de generación fotovoltaico*

Parámetro	Valor
$G(\beta, \alpha)$ [W/m <sup>2</sup> ]	Obtenido de los datos meteorológicos de la localidad
$T_a$ [°K]	Obtenido de los datos meteorológicos de la localidad
Tipo de panel solar	Silicio poli cristalino
$P_{STC}$ [W]	250
$G_{STC}$ [W/m <sup>2</sup> ]	1000
$T_{STC}$ [°C]	25
$C_{ta}$ [°C/(W/m <sup>2</sup> )]	0.030
$\gamma$ [%/°C]	-0.45
Número de paneles	32

**Tabla 19***Parámetros del modelo matemático del almacenador térmico*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
$\rho_w$ [ $g/m^3$ ]	$977 \times 10^3$
$C_p$ [J/g K]	4.1813
$V$ [ $m^3$ ]	0.8
$T_s$ [s]	3600
$L$ [m]	2.83
$R_1$ [cm]	20
$R_2$ [cm]	30
$k_T$ [W/m K]	0.044

**Tabla 20***Parámetros del modelo matemático para la estimación del SOC*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
$C_{BAT}$ [kWh]	10
$T_s$ [s]	3600
$\eta_D$ [%]	80
$\eta_C$ [%]	80

**Tabla 21***Parámetros utilizados en el EMS basado en control heurístico*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
$SOC_{min}$ [%]	50
$SOC_{max}$ [%]	80
$P_{BATmax}$ [kW]	3.5

$T_{\min}$ [°C]	35
$T_{\max}$ [°C]	75

---

**Resultados.** La simulación del segundo caso de estudio busca la integración y trabajo conjunto de los elementos que forman parte del sistema de generación y almacenamiento, bajo el control del EMS basado en control heurístico, de modo que siga las reglas propuestas en secciones anteriores. De forma similar al primer caso, la potencia de referencia que ingresa al algoritmo de cálculo de velocidad óptima ( $P_{DG}$ ), que para este caso es la diferencia entre el perfil de consumo, la potencia de generación fotovoltaica y la potencia de descarga de la batería, es multiplicada por una ganancia de 25% para asegurar que se cumpla con las necesidades de potencia de la carga.

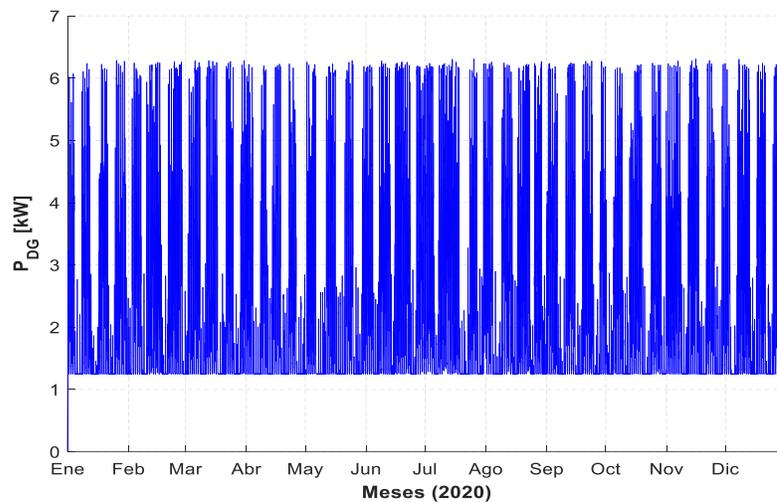
Un aspecto que cabe mencionar de la simulación, es la inclusión de un bloque de saturación que hace que el generador a diésel siempre genere como mínimo 1 kW de potencia. Esto es debido a que en simulaciones anteriores se observó que al apagar por completo al generador a diésel y volverlo a encender para que genere una potencia determinada los retardos propios de la dinámica de la planta hacen que esta no pueda seguir adecuadamente a la referencia, por lo que se generan puntos en el tiempo en los cuales el sistema no es capaz de satisfacer la potencia necesaria en la carga.

En Figura 32 y Figura 33 se observan los resultados obtenidos para la potencia generada y la velocidad de giro del motor bajo las condiciones del segundo caso. En la potencia generada se observa que la misma presenta en todo momento un valor superior a 1 kW debido al bloque de saturación mencionado y de igual forma se observa que existen periodos de tiempo en los cuales la potencia disminuye significativamente dado que ahora se utiliza la potencia proveniente de los paneles fotovoltaicos y de la

batería. El comportamiento antes descrito también es reflejado en la velocidad que debe adquirir el motor a diésel de acuerdo al algoritmo, en donde puede observarse que oscila entre los 225 a los 290 rad/s.

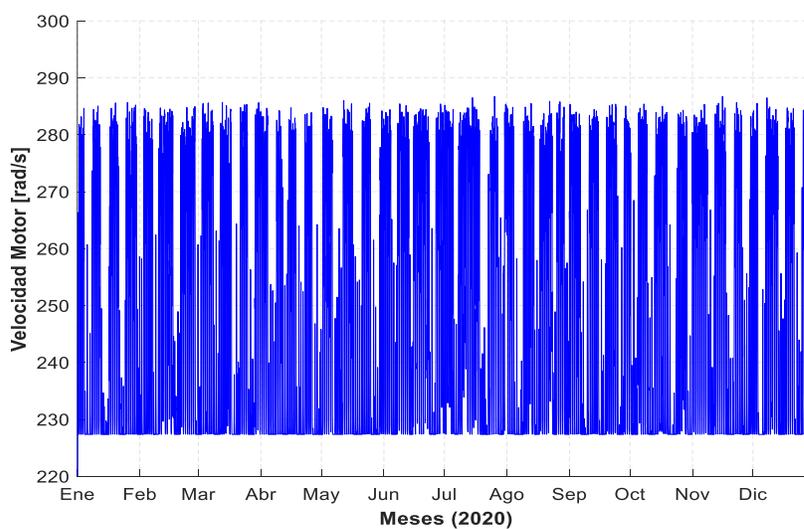
**Figura 32**

*Potencia generada por el generador a diésel (Caso 2)*



**Figura 33**

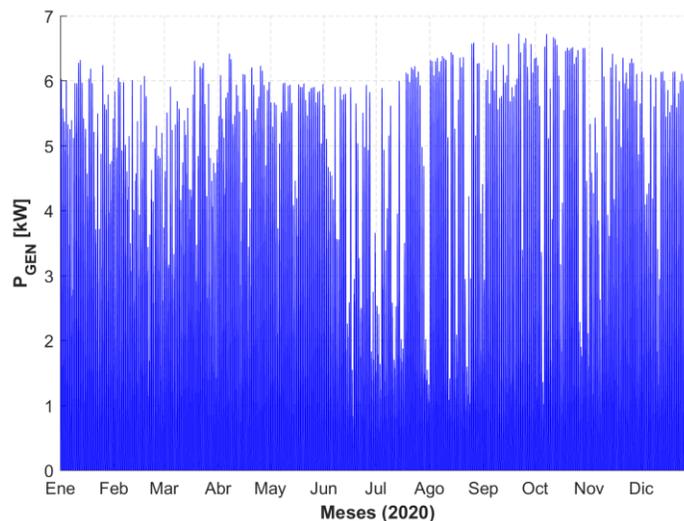
*Velocidad del motor a diésel acoplado al generador (Caso 2)*



Con respecto a la potencia de generación fotovoltaica producida durante todo el año, esta se puede observar en Figura 34. De acuerdo a la configuración propuesta se consigue obtener un perfil de potencia que sirva de apoyo al generador a diésel y disminuya la carga del mismo. Los valores correspondientes a los meses de mayor y menor generación durante el año están de acuerdo a los valores de irradiación solar de la localidad de estudio presentados en Tabla 7.

**Figura 34**

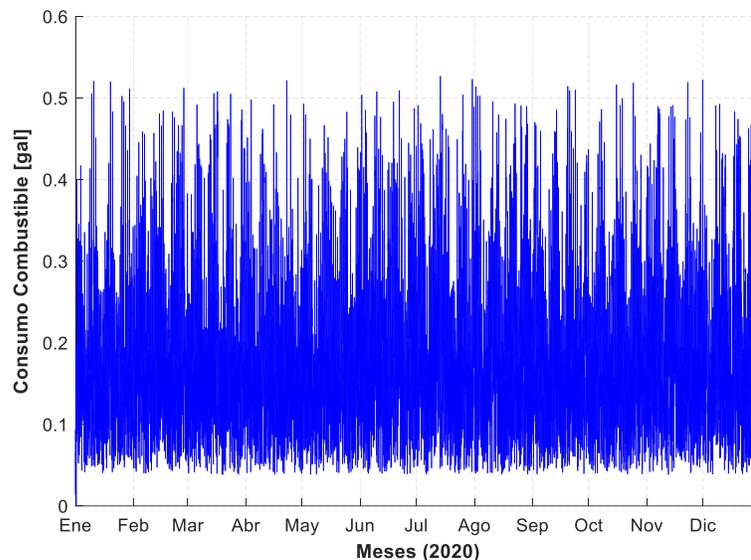
*Potencia de generación fotovoltaica*



De forma similar se observa en Figura 35 el consumo anual de combustible medido en galones de diésel calculado a partir de los datos de BSFC obtenidos de la simulación. Los meses con mayor consumo con la utilización de este sistema corresponden a junio, julio y agosto, mientras que el de menor consumo es abril, esto da como resultado un consumo anual de  $1.6036 \times 10^3$  galones. La cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por el uso del generador a diésel alcanzan un valor de 16.0361 ton CO<sub>2</sub>.

**Figura 35**

*Consumo del generador en galones de diésel (Caso 2)*



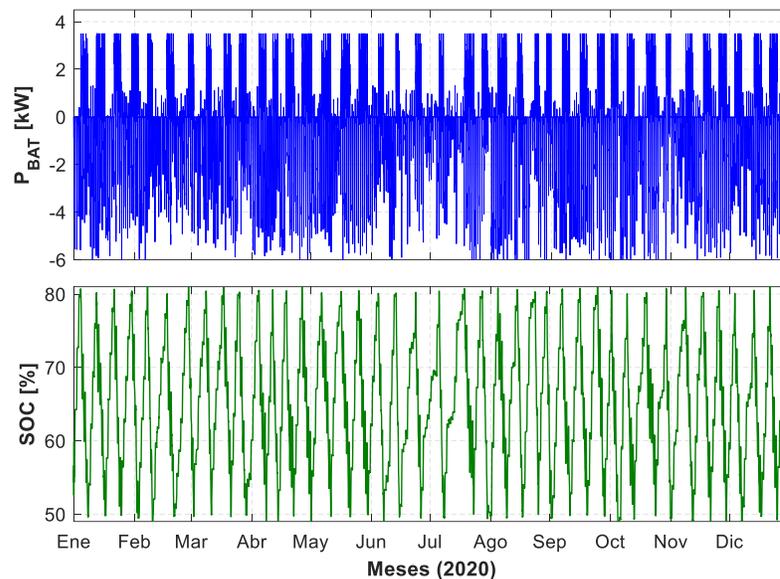
Dado que para el segundo caso de estudio se realiza la inclusión de un sistema de almacenamiento se presentan los resultados obtenidos de su uso dentro del sistema. Para el almacenador eléctrico en Figura 36 se presentan los datos de la potencia de la batería y del nivel de SOC para todo el año. Para el caso de la potencia de la batería se observa el flujo de potencia dirigida hacia la misma de acuerdo al control del EMS. Los valores positivos corresponden, a la energía entregada por la batería hacia el sistema de generación para contribuir con el abastecimiento de potencia cuyo valor no excede los 3.5 kW de acuerdo a las reglas propuestas. Por otro lado, los valores negativos indican la energía absorbida por la batería la cual proviene tanto de la potencia excedente de generación renovable como de la potencia residual producida por el generador a diésel.

De los resultados del SOC de la batería puede observarse la evolución del mismo a lo largo del año, donde los niveles permanecen dentro de un rango medio requerido para alargar el tiempo de vida de la batería. Se observa como de acuerdo a

las reglas planteadas se produce la desconexión de la energía dirigida hacia la batería cuando el SOC alcanza el valor de 80% y de igual forma se realiza la desconexión de la energía entregada por la misma al alcanzar un SOC de 50%.

**Figura 36**

*Potencia y SOC del almacenador eléctrico (Caso 2)*

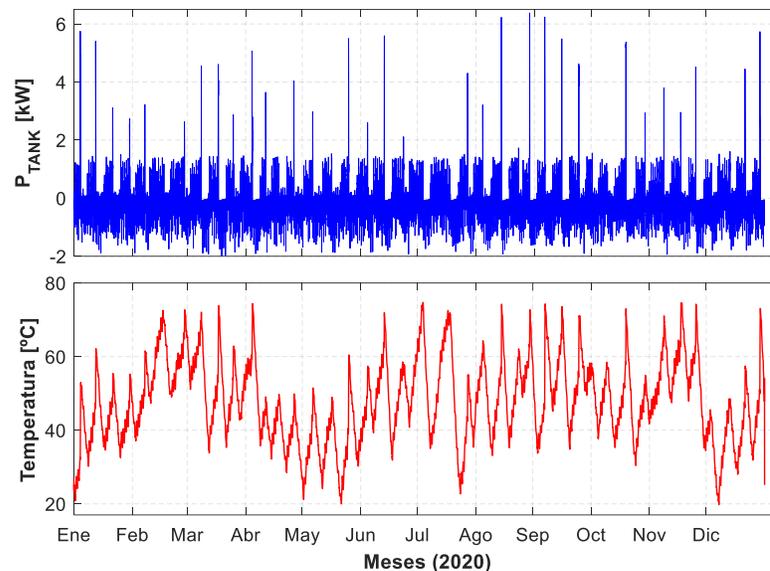


Por su parte los resultados obtenidos con respecto al almacenador térmico son mostrados en Figura 37, donde se pueden observar los datos de la potencia almacenada/entregada por el tanque de agua, además de la temperatura al interior del mismo. Para el caso de la potencia, a diferencia del almacenador eléctrico, los valores positivos hacen referencia a la potencia que es dirigida hacia el tanque para su almacenamiento la cual proviene de la potencia residual total de la operación del sistema (Ecuación 4.20), mientras que los valores negativos corresponden al consumo de agua caliente simulado, sumado a las pérdidas por convección debido a la diferencia de temperatura entre el interior del tanque y la ambiental.

En el siguiente conjunto de datos correspondiente a la temperatura en el interior del tanque, se observa como la misma evoluciona a lo largo del tiempo manteniéndose entre los límites propuestos dentro del control, en donde se produce la desconexión de la potencia que alimenta al calentador eléctrico del tanque cuando la temperatura alcanza los 75°C y vuelve a conectarse cuando la misma haya alcanzado los 35°C.

**Figura 37**

*Potencia y temperatura al interior del tanque de agua (Caso 2)*

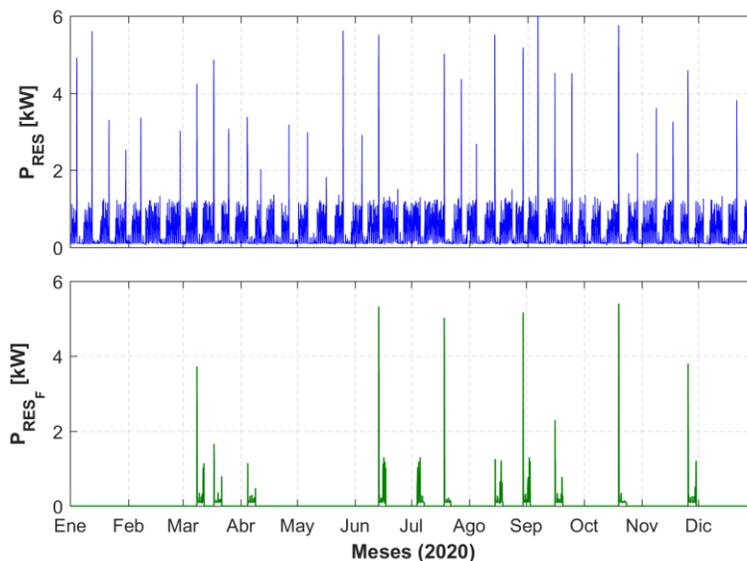


Por último, con la consideración de que ahora tanto la potencia residual total del sistema como la potencia residual producida por el generador a diésel son utilizadas directamente por el sistema de almacenamiento. La potencia desperdiciada para este caso de estudio corresponde a la potencia que no pudo ser almacenada dentro del tanque de agua, dado que este almacenador constituye el final de la cadena dentro del sistema. En Figura 38 se muestra una comparación entre la potencia residual antes de su utilización por parte del sistema de almacenamiento (grafico superior) y posterior a su uso dentro de este sistema (grafico inferior). Se obtiene que el valor total de esta

potencia residual antes de su uso en el sistema de almacenamiento es de 3.3682 MW, mientras que la potencia desperdiciada final del sistema es de 292.4 kW.

### Figura 38

*Comparación entre la potencia residual antes y después de su uso en el sistema de almacenamiento*



### **Análisis de resultados**

Los resultados obtenidos de estas primeras simulaciones que comparan el desempeño del sistema mediante el uso únicamente un generador a diésel, con respecto al uso de un sistema de generación y almacenamiento híbrido, están enfocados en obtener una visión general del comportamiento de dichos sistemas ante los perfiles de consumo, irradiación y temperatura de la localidad. Por esta razón se observan graficas que abarcan todo el año con el fin de establecer un análisis de los dos casos de estudio. Un resumen de los resultados principales es presentado en Tabla 22.

**Tabla 22***Resultados para un año de dos casos de estudio*

<b>Parámetros</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>
Motor a diésel	RT 140 DI-ES	OC95-E2
Consumo de combustible total [gal]	1.2518x10 <sup>3</sup>	1.6036x10 <sup>3</sup>
Emisiones de CO2 totales [ton CO2]	12.5183	16.0361
Potencia desperdiciada total [kW]	2.4065x10 <sup>3</sup>	292.4
Reducción de potencia desperdiciada comparada con el Caso 1 [%]	-	87.84

De los resultados obtenidos de ambos casos de estudio se observan una diferencia principalmente en el comportamiento del algoritmo que determina la velocidad óptima de giro del motor, el consumo de combustible, las emisiones de CO2 y la potencia desperdiciada. Para el primer aspecto se observa como en el Caso 1 la velocidad de referencia que debe seguir el motor esta generalmente determinada en 250 rad/s con pequeñas variaciones a lo largo de todo el año. Al contrario del Caso 2 donde este rango de velocidad se vuelve mayor al tomar valores entre 225 a 290 rad/s para ajustarse al nuevo perfil de consumo resultante de añadir los demás elementos de generación y almacenamiento. Este comportamiento guarda relación directa con el consumo y emisiones de CO2.

Debido al comportamiento propio del motor a diésel, el cual tiene la característica de disminuir su consumo específico de combustible a medida que el valor de la potencia generada y velocidad en el eje aumentan, lo cual se refleja en las gráficas características de cada motor. Se deduce que mientras menor sea la potencia que debe generar el generador a diésel mayor será el consumo de combustible. Con base a este comportamiento se utiliza un motor a diésel diferente para cada uno de los casos de estudio con el objetivo de adaptarse a las necesidades de consumo de cada situación.

Para el Caso 2 con la integración de un generador fotovoltaico y la batería, el perfil de potencia del generador a diésel es menor al original, por lo cual el tamaño y capacidad de este último generador deberá ser menor, lo que conlleva un ahorro económico para la comunidad en el costo de la máquina. Sin embargo, se observa que los parámetros de consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> presentan un incremento, lo que también es debido a la inclusión del bloque de saturación que hace que la potencia generada siempre sea como mínimo de 1 kW con el objetivo de tener un mejor seguimiento a referencia del controlador. La potencia excedente generada es utilizada para cargar la batería y de esta forma asegurar que tenga energía suficiente almacenada para periodos de tiempo donde el consumo sea alto o por el contrario la generación por medio de fuentes renovables sea baja.

Como es evidente el aspecto referente a la disminución de la potencia desperdiciada es el más significativo con una reducción del 87.84% con respecto al Caso 1, debido a la inclusión del sistema de almacenamiento híbrido. Mediante esta modificación se hace un mejor uso de la potencia excedente generada a diferencia del Caso 1, y de este modo conseguir un sistema más eficiente con menos desperdicio de energía. De esta forma, aunque el Caso 2 presenta un mayor consumo de combustible

asociado a la potencia que debe generarse, esta a su vez es utilizada para dar un beneficio extra a la comunidad, a través del almacenamiento en forma de energía térmica dentro del tanque de agua, la cual que puede ser utilizada por los habitantes de la localidad como un servicio adicional del sistema.

### **Comparación de Estrategias de Gestión de Energía para el Almacenador Eléctrico**

El objetivo de esta segunda sección de simulaciones consiste en la comparación de dos casos de estudio para la misma comunidad aislada con el uso de los datos y perfiles presentados anteriormente. Para el primer caso se utiliza el escenario propuesto para el Caso 2 de la primera parte de las simulaciones, donde se incluye la arquitectura completa del sistema de generación y almacenamiento híbrido bajo el control de un EMS basado en control heurístico. Esta estrategia sigue las reglas presentadas en la Sección 4.2 con el objetivo de abastecer de potencia a la comunidad en estudio, hacer un mejor uso de la potencia residual del sistema y alargar el tiempo de vida del almacenador eléctrico.

Para el segundo caso se sigue la misma arquitectura utilizada en el primer caso, con la diferencia que se hace uso de un EMS basado en control por lógica difusa (FLC) de acuerdo al diseño presentado en la Sección 4.3 donde se busca principalmente una suavización del perfil de potencia del generador a diésel. Las entradas de este controlador son la derivada de la potencia promedio, como una predicción local del comportamiento de  $P_{LG}$  y el SOC de la batería para asegurarse de que su valor se encuentre siempre entre los límites determinados para una batería de litio.

Esta sección de simulaciones, a diferencia de la primera, está enfocada en los resultados particulares para días en los cuales la irradiación solar tenga valores altos, bajos y medios, con el fin de determinar el comportamiento de los sistemas bajo

diferentes estrategias de control y analizar sus resultados en base al desempeño obtenido.

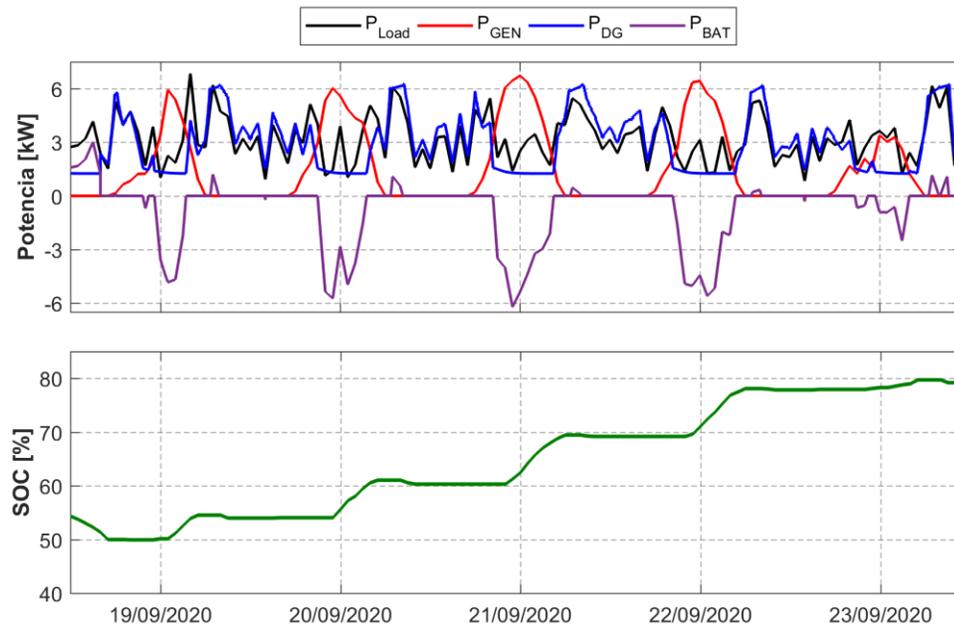
***Caso 1: Utilización de estrategia basada en control heurístico (HC)***

Como se mencionó anteriormente este primer caso de estudio se encuentra definido dentro de la Sección 5.1.2, donde se presentan los parámetros a utilizarse dentro de los modelos y controladores, al igual que su implementación en Simulink.

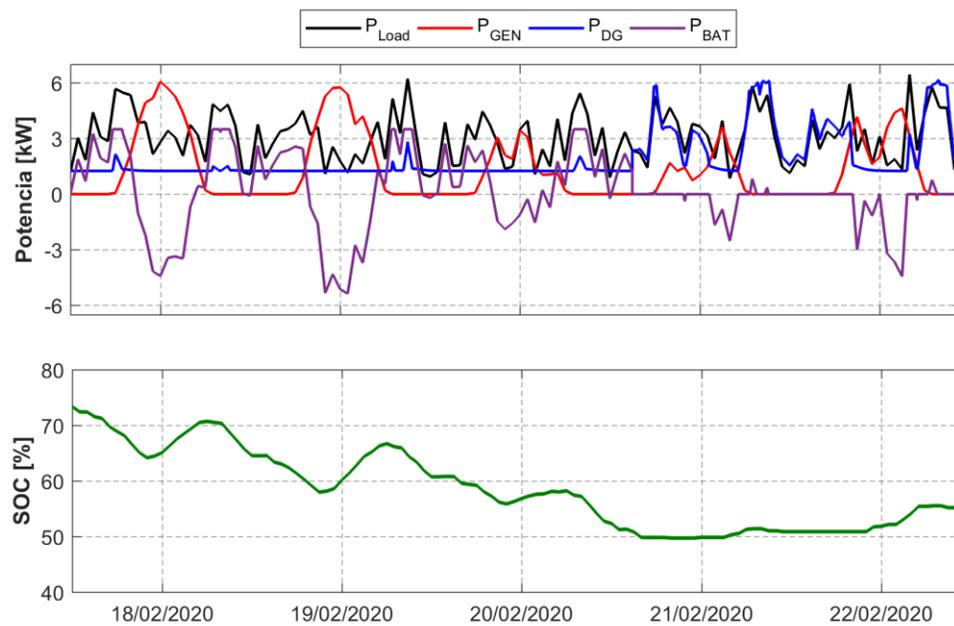
**Resultados.** En base a los mismos parámetros del segundo caso de la primera sección de simulaciones, se obtiene los resultados específicos para determinar el desempeño del EMS basado en control heurístico. Para esto se selecciona tres días del año 2020 donde la irradiación solar es considerada alta, media y baja para observar el comportamiento de  $P_{GEN}$ ,  $P_{DG}$ ,  $P_{BAT}$  y el SOC de la batería. Los resultados son mostrados en Figura 39 donde se observan los días seleccionados para cada caso de irradiación mencionado.

**Figura 39**

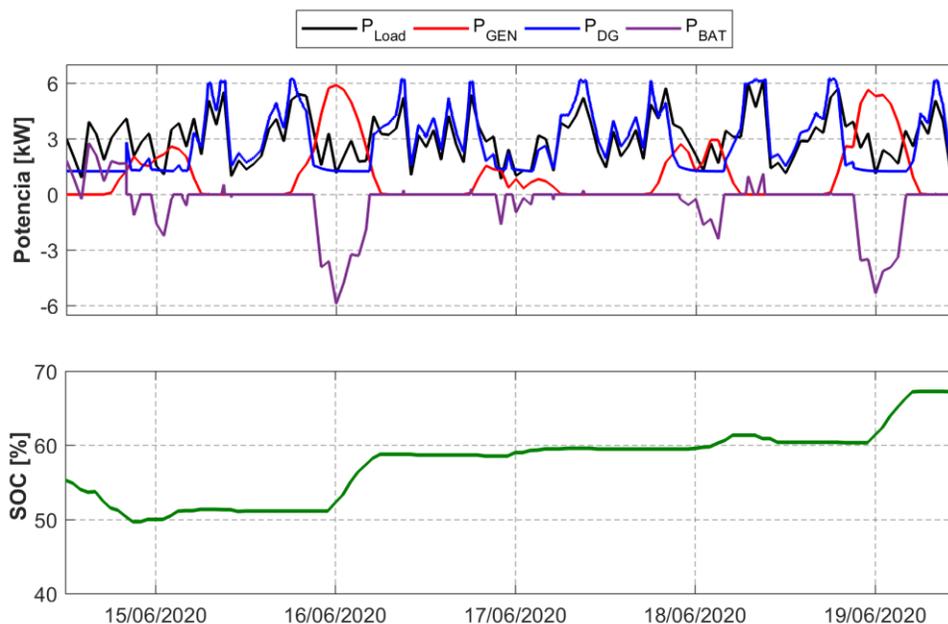
Comportamiento del sistema con EMS basado en control heurístico bajo condiciones de irradiación solar (a) alta, (b) media y, (c) baja



(a)



(b)



(c)

Como se puede observar en la figura anterior para los tres escenarios propuestos, cuando la potencia fotovoltaica (línea roja) es nula, lo que se produce en horas de la madrugada y de la noche, la potencia del generador a diésel (línea azul) intenta ajustarse al consumo mediante el uso del algoritmo de cálculo de velocidad óptima. A su vez la potencia de la batería (línea púrpura) realiza un aporte de energía al sistema durante estos periodos de tiempo o por el contrario cuando la potencia de generación renovable es superior al consumo necesario esta toma un valor negativo para realizar la carga de la batería, comportamiento que se ve reflejado en SOC para cada uno de los escenarios.

Para el día en el que se tiene una irradiación solar alta (21/09/2020), de acuerdo a la configuración de los paneles fotovoltaicos se genera un máximo de 6.72 kW, de forma particular para este día se observa que el generador a diésel es la forma principal de abastecimiento de potencia desde las primeras horas del día. Se observa que esta

potencia es superior a los valores de consumo debido a la ganancia colocada para asegurar que siempre se cumpla con las necesidades de potencia en la carga. A partir de las 09:00 horas con el aumento de la irradiación solar la potencia de generación fotovoltaica se convierte en la principal fuente donde su excedente es almacenado dentro de la batería.

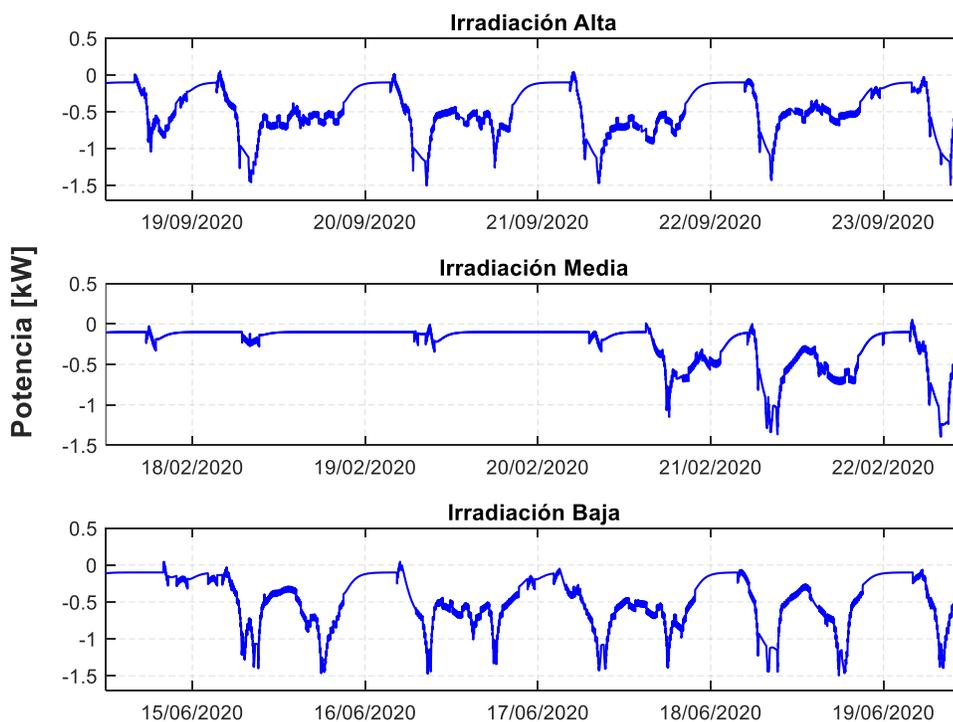
En el día en que la irradiación solar tiene un valor medio (20/02/2020) la potencia máxima generada por el panel fotovoltaico es de 3.43 kW, a diferencia del escenario anterior en este caso se observa que la batería es la principal fuente de aportación de energía por lo que se puede observar una caída del SOC hasta valores menores a 55%. A continuación, le sigue el generador a diésel que en este caso mantiene una potencia constante de 1.25 kW la mayor parte del tiempo, con excepción de las 20:00 horas donde la potencia entregada por la batería alcanza su máximo especificado y el generador a diésel aporta la potencia restante para abastecer a la carga. Por último, en el día con menor irradiación solar (17/06/2020) la potencia de generación fotovoltaica alcanza un máximo de 1.54 kW, por lo que el generador a diésel es la principal fuente de energía a lo largo durante todo el día y se producen pequeñas cargas en la batería en los momentos del día donde se tiene mayor cantidad de potencia fotovoltaica.

De acuerdo a estos tres escenarios en Figura 40 se presenta el balance de potencia correspondiente, donde se observa como los valores negativos de potencia representan la potencia residual producto de la generación excedente dentro del sistema. Esta potencia es dirigida posteriormente hacia el almacenador térmico para ser utilizada por la comunidad aislada, un aspecto importante de estos resultados es que este balance de potencia nunca toma valores mayores a cero, lo que indicaría una falta de abastecimiento de potencia para la carga. Por lo tanto, el sistema junto con el EMS basado en control heurístico cumple con su objetivo de suministrar potencia a la carga

en todo momento, sin embargo, en la simulación anual se observan pequeños puntos en el tiempo en los cuales este balance alcanza valores pequeños de hasta 100 W, producidos debido a la incapacidad del controlador de seguir a la referencia de velocidad dada por el algoritmo.

**Figura 40**

*Balance de potencia del sistema basado en control heurístico*



### **Caso 2: Utilización de estrategia basada en FLC**

Al igual que en el primer caso con la estrategia basada en control heurístico se busca satisfacer las necesidades de consumo de la comunidad, realizar un uso más eficiente de la energía por medio de la implementación de un sistema de almacenamiento e incrementar la vida útil de la batería. Sin embargo, en este caso se hace uso de una estrategia basada en FLC que además tiene por objetivo suavizar el perfil de potencia del generador a diésel. Esta estrategia hace uso de la derivada del

promedio de las últimas 24 horas de  $P_{LG}$ , y del SOC para reducir los picos de potencia y mantener el nivel de la batería dentro de límites seguros. Se utiliza un sistema de dos entradas y una salida con un conjunto de 5 funciones de membresía triangulares para cada uno, en base a las especificaciones presentadas en la Sección 4.3.3 y los parámetros descritos en Tabla 25, además de una base de 25 reglas formadas para conseguir el mejor desempeño de la estrategia presentada.

El vector de salida del controlador FLC es utilizada como el valor de referencia de potencia dentro del algoritmo de velocidad óptima del motor a diésel para continuar con el desarrollo normal de la simulación al igual que en Caso 1. De este modo la generación del perfil de potencia del generador a diésel y el control de carga/descarga de la batería estará a cargo de la estrategia FLC. Mientras que el almacenador térmico utiliza la misma estrategia de control que en el Caso 1 para almacenar la potencia residual final del sistema para su posterior uso por parte de la comunidad.

### Implementación en Simulink.

**Figura 41**

*Estrategia de control basada en lógica difusa (FLC)*

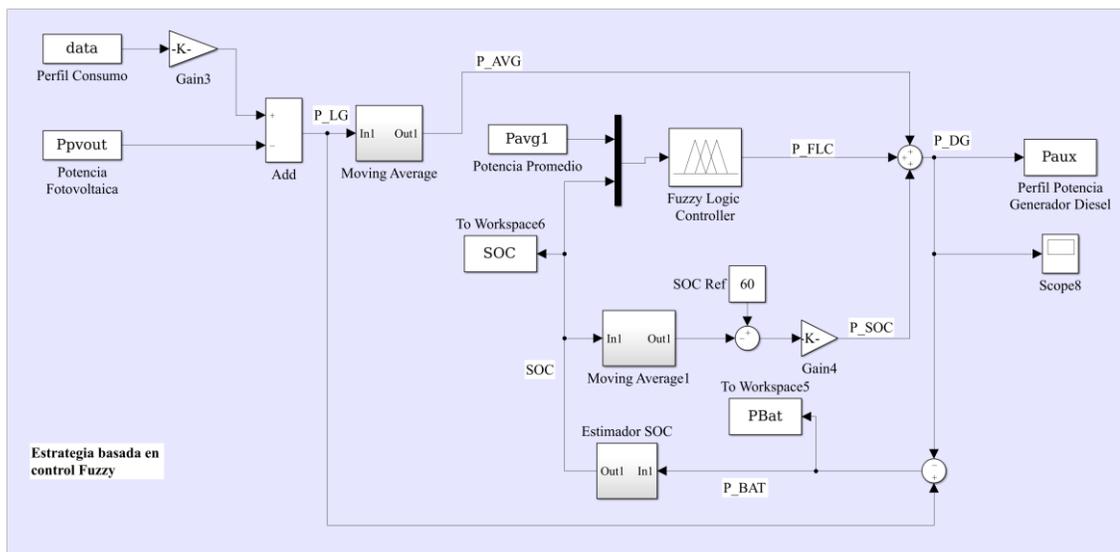
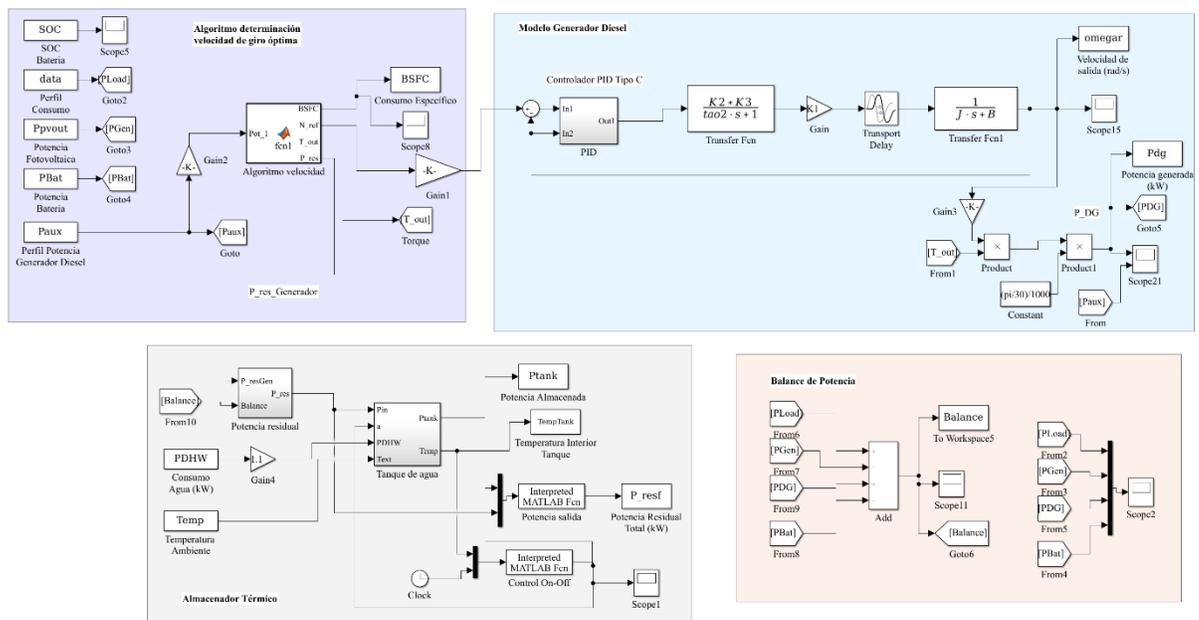


Figura 42

Modelo del sistema para la estrategia basada en lógica difusa



### Resumen de parámetros de modelos y controladores. En las siguientes

tablas se presentan los parámetros y los valores utilizados para la simulación de los modelos matemáticos, controladores y diseño de la estrategia de control descritos en capítulos anteriores

Tabla 23

Característica del motor a diésel acoplado al generador

Parámetro	Valor
Fabricante	Kubota
Modelo	OC60-E2
Numero de cilindros	1
Salida continua [kW/rpm]	4.2 kW/3600
Salida intermitente [kW/rpm]	4.5 kW/3600
Velocidad máxima [rpm]	3600

Velocidad mínima [rpm]	1300
Torque máximo [Nm/rpm]	13.7/2400
Combustible	Combustible diésel No. 2-D

**Tabla 24**

*Parámetros utilizados en el algoritmo de cálculo de velocidad optima (Caso 2)*

Parámetro	Valor
Rango velocidad [rpm]	1200 – 3600
Rango torque [Nm]	1 – 14
Potencia mínima de funcionamiento [kW]	0.5
A	$-1.4583 \times 10^{-6}$
B	$7.2583 \times 10^{-3}$
C	4.515
$a_1$	671.8
$a_2$	-0.1409
$a_3$	-32.12
$a_4$	$2.228 \times 10^{-5}$
$a_5$	0.001392
$a_6$	1.081

**Tabla 25**

*Parámetros utilizados en el EMS basado en control difuso*

Parámetro	Valor
$SOC_{REF}$ [%]	60
$k_e$ [kW/%]	0.005

$T_s$ [s]	3600
$SOC_{min}$ [%]	20
$SOC_{max}$ [%]	80
$\dot{P}_{AVG,min}$ [kW]	-0.3
$\dot{P}_{AVG,max}$ [kW]	0.3
$k$	2
$T_{min}$ [°C]	25
$T_{max}$ [°C]	75

---

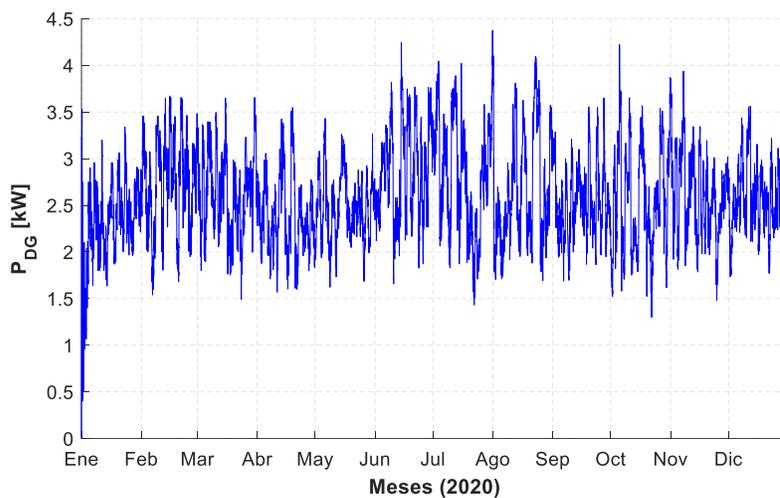
**Resultados.** Para el caso de estudio del sistema de generación y almacenamiento híbrido con EMS basado en FLC, se utiliza una arquitectura similar al caso anterior donde primero se realiza la simulación del control Fuzzy con los datos de potencia de las cargas y generación fotovoltaica de forma que se establezca el perfil del generador a diésel, además de la potencia que será entregada/absorbida por la batería como se puede observar en Figura 41. El perfil generado por la estrategia de control será multiplicado por una ganancia de 8% para asegurarse que se cumpla con las necesidades de potencia en todo momento, luego de esto la simulación con respecto al generador a diésel y el almacenador térmico se desarrollan de forma normal de acuerdo a lo descrito en secciones anteriores.

De forma similar al caso anterior, primero se obtienen resultados generales del desempeño del sistema. En Figura 43 y Figura 44 se observan los resultados correspondientes a la potencia generada y la velocidad de giro del motor. En la potencia generada se observa que de acuerdo a la estrategia basada en FLC se busca que el perfil del generador a diésel siempre tenga valores positivos de modo que no genere potencia excedente durante su operación normal. Además, el perfil generado se

encuentra suavizado debido al uso del filtro Moving Average que promedia los valores de las últimas 24 horas de  $P_{LG}$ . La velocidad a la salida del motor a diésel sigue un comportamiento similar a la potencia generada mediante la utilización del algoritmo donde se observa que la velocidad del mismo oscila entre los 150 a los 340 rad/s.

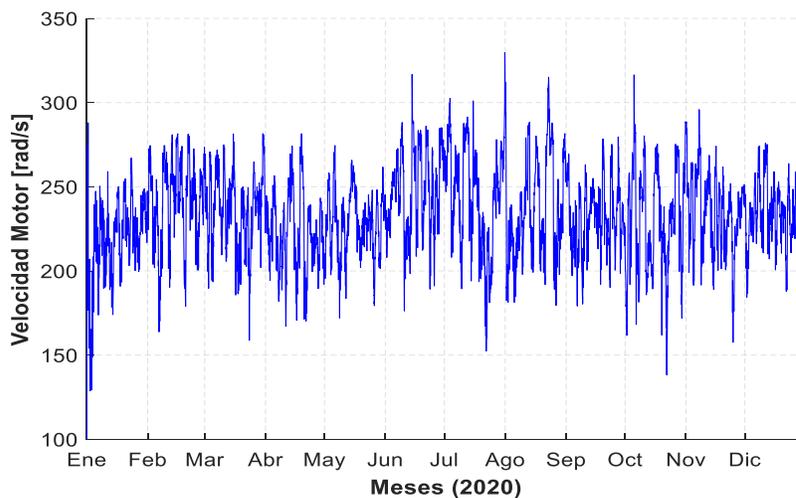
**Figura 43**

*Potencia generada por el generador a diésel (EMS FLC)*



**Figura 44**

*Velocidad del motor a diésel acoplado al generador (EMS FLC)*

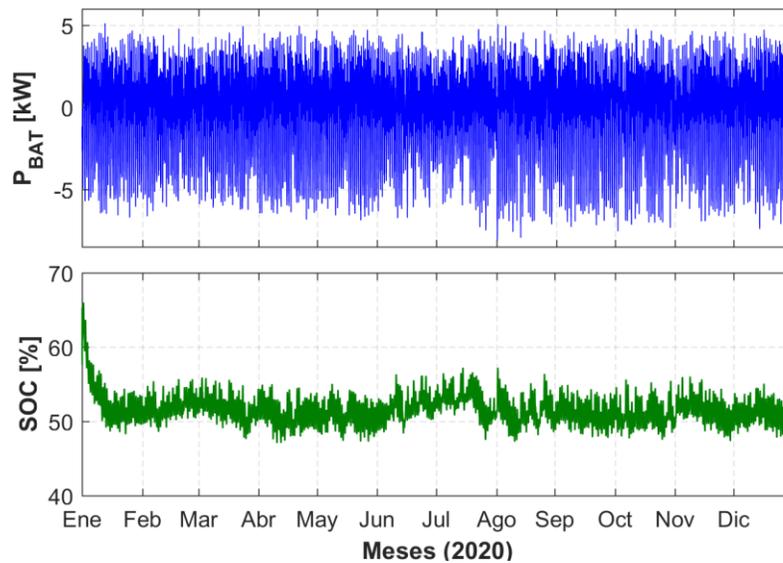


El consumo anual de combustible es calculado a partir de los datos de BSFC obtenidos del algoritmo de velocidad óptima del motor, de este modo se tiene que el consumo anual con el uso de esta estrategia de control es de  $2.4136 \times 10^3$  galones, correspondiente a 24.14 ton CO<sub>2</sub> producidas por el uso del generador a diésel. Con respecto al sistema de almacenamiento, el control Fuzzy tiene establecido en su base de reglas los valores límites de SOC para la batería. Mediante la integración de un control en lazo cerrado se intenta mantener el SOC en un valor intermedio de 60% para incrementar la vida útil de la batería.

En Figura 45 se presentan los resultados obtenidos de la potencia de la batería y del nivel de SOC para todo el año, el rango de potencia de la batería se encuentra entre -8 a 6 kW, por lo cual la carga de la batería es superior a su descarga. De forma particular el SOC mediante el uso de esta estrategia de control evoluciona dentro de un rango pequeño por debajo del SOC de referencia establecido, pero que se encuentra dentro de los valores medios considerados para la batería de litio. En este caso las desconexiones de energía dirigida y entregada por la batería se producen de forma más frecuente con el objetivo de seguir el valor de referencia especificado.

**Figura 45**

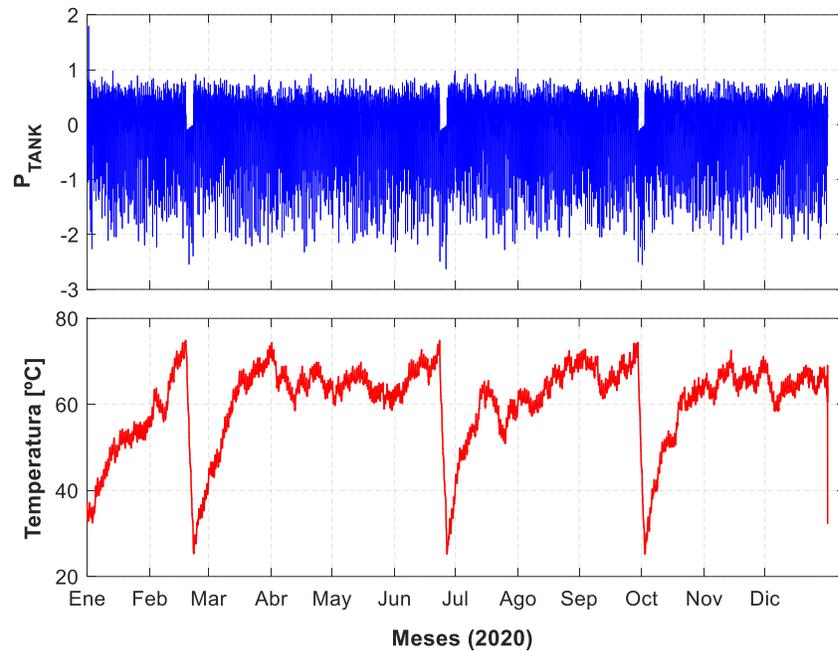
*Potencia y SOC del almacenador eléctrico (EMS FLC)*



Con respecto al almacenador térmico, se utiliza la misma estrategia de control que en el primer caso donde la potencia residual del balance de potencia del sistema es almacenada en forma de agua caliente para su uso dentro de la comunidad. Los resultados de la potencia almacenada/entregada por el tanque de agua y la temperatura del agua al interior del tanque se muestran en Figura 46, donde se establece un rango de control para la temperatura que se encuentra entre los 25 a 75°C.

**Figura 46**

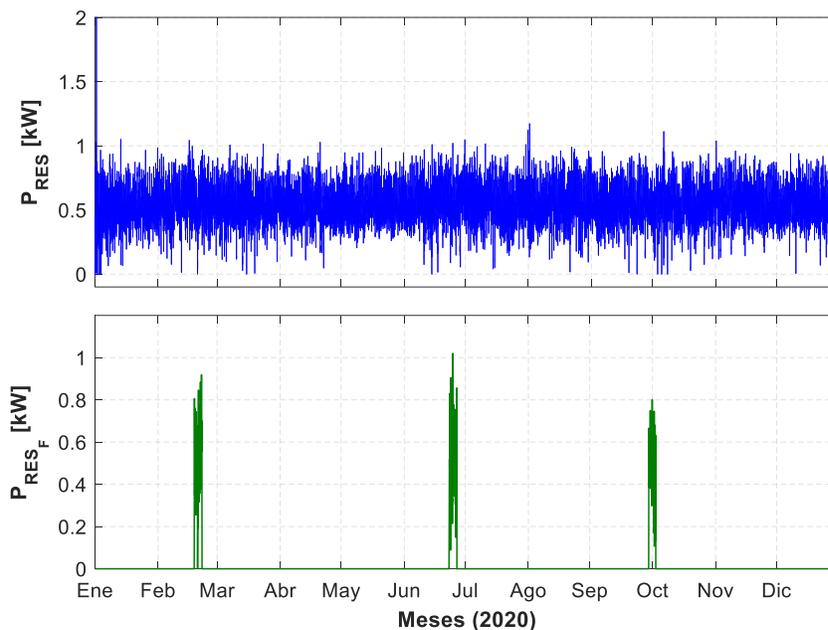
*Potencia y temperatura al interior del tanque de agua (EMS FLC)*



Por último, entre los resultados generales de la simulación con la estrategia de control basada en FLC se hace referencia a la potencia desperdiciada del sistema luego de uso dentro del sistema de almacenamiento. Esta corresponde a la potencia que no fue almacenada dentro del almacenador térmico, como se observa en la figura anterior, existen menos periodos de tiempo en los cuales la temperatura del tanque de agua alcanza su valor máximo por lo cual la potencia desperdiciada de igual forma se reduce considerablemente. En Figura 47 se observan los resultados de la potencia residual obtenida antes de uso por el sistema de almacenamiento (grafico superior) y después (grafico inferior). Se obtiene que el primer valor corresponde a 4.7544 MW, mientras que el segundo es de 138 kW.

**Figura 47**

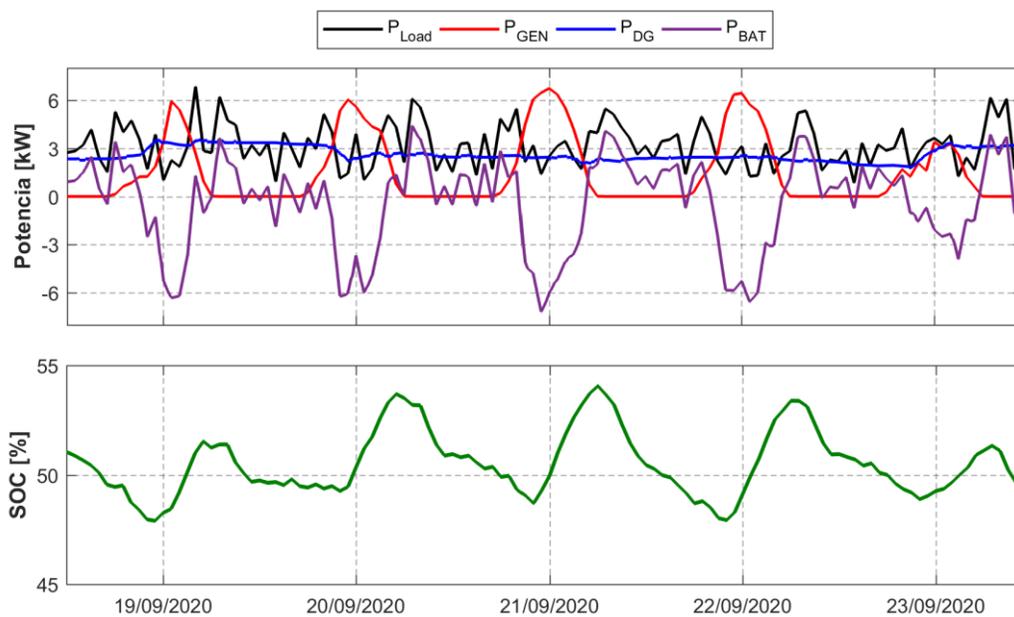
*Comparación entre la potencia residual antes y después de su uso en el sistema de almacenamiento (EMS FLC)*



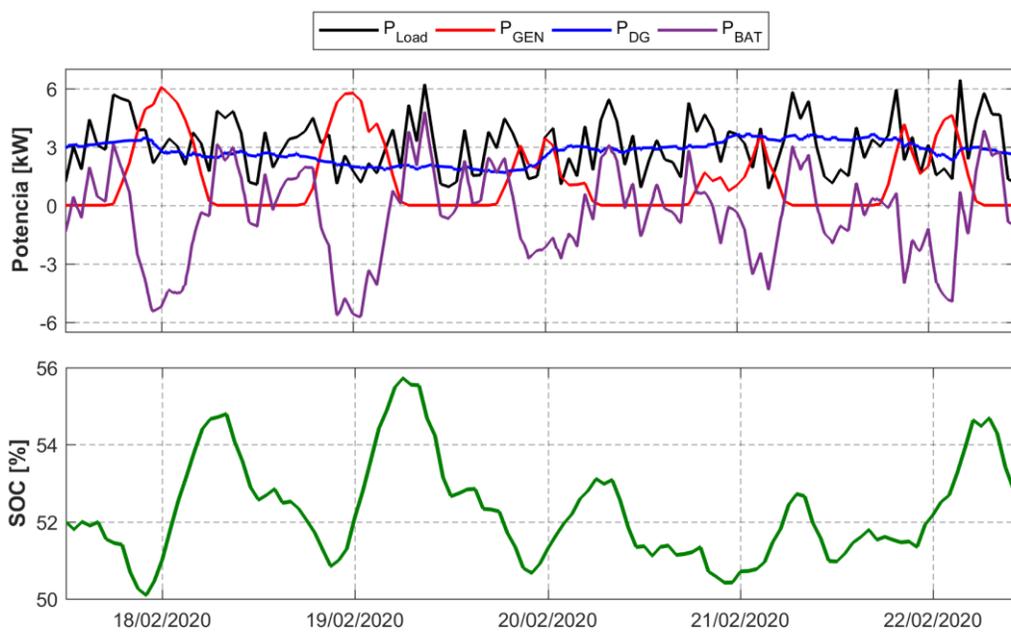
Se muestran a continuación los resultados particulares del desempeño del sistema en conjunto con el EMS para días específicos del año considerados con irradiación solar alta, media y baja. Con el fin de establecer una comparación se utilizan los mismos días del caso anterior y se muestran las mismas variables. Los resultados se muestran en Figura 48 donde se observan los datos obtenidos de los elementos que conforman el sistema luego de realizar las respectivas simulaciones.

**Figura 48**

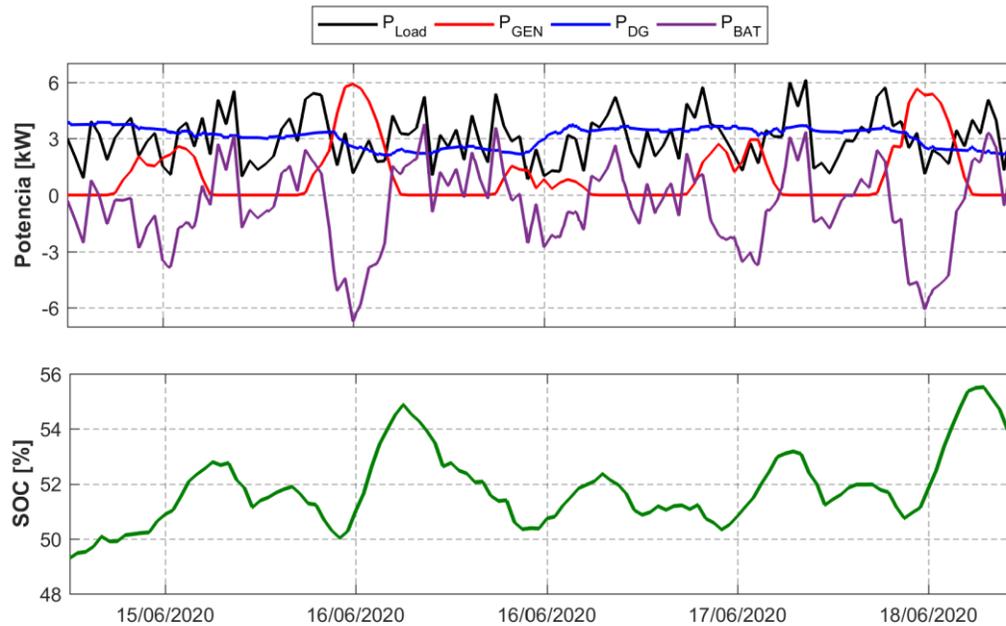
Comportamiento del sistema con EMS basado en FLC bajo condiciones de irradiación solar (a) alta, (b) media, y (c) baja



(a)



(b)



(c)

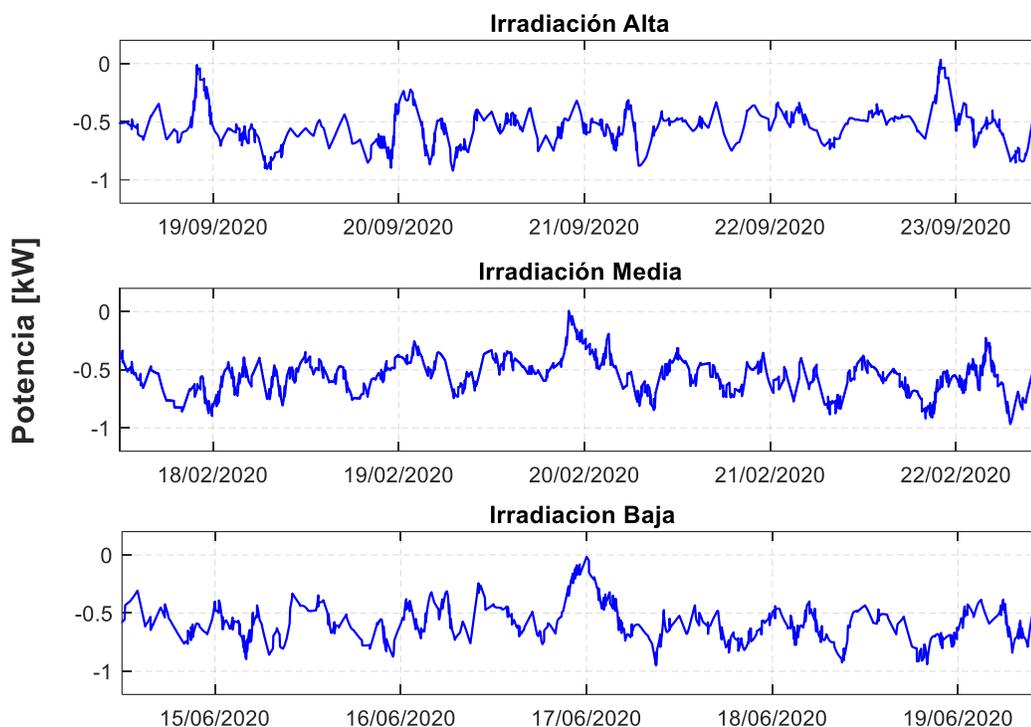
Como se puede observar, a diferencia del primer caso de estudio donde la potencia del generador a diésel (línea azul) es en ciertos periodos de tiempo la fuente principal de potencia adaptándose a las necesidades de la carga. En este caso la potencia entregada por la batería (línea púrpura) es la que abastece principalmente de potencia a la carga debido a su capacidad de variar rápidamente su valor en base a una referencia dada. A continuación, se encuentra la potencia del generador a diésel que de forma general puede observarse que mantiene un nivel relativamente constante de potencia suministrada. Esta se incrementa en periodos de tiempo en los que tanto la potencia fotovoltaica como de la batería no son capaces de abastecer la potencia requerida en las cargas, con lo cual se refleja el perfil suavizado para el generador a diésel resultado del uso de la estrategia de control basada en FLC y el bloque de filtrado mediante Moving Average.

En la figura anterior tanto para los escenarios en los que la irradiación solar es alta, media y baja, se observa el comportamiento descrito anteriormente en el cual la batería es la principal fuente de energía del sistema adaptándose al perfil de consumo principalmente en las primeras horas del día hasta las 09:00 y posterior a las 17:00. El periodo de tiempo entre estas dos horas, donde se produce una mayor cantidad de potencia fotovoltaica, es utilizado para la carga de la batería con la potencia excedente, por lo cual el suministro de energía se encuentra realizado únicamente por el generador a diésel y los paneles fotovoltaicos.

Al igual que en el caso anterior, en Figura 49 se presenta los resultados de las simulaciones con respecto al balance de potencia para cada uno de los escenarios. Puede observarse que al tener únicamente potencia con valores negativos, el sistema junto con el EMS basado en FLC es capaz de suministrar de potencia a las cargas durante todas las horas del día. No obstante, de forma análoga al caso anterior, a partir de los resultados de la simulación anual se observan puntos en los cuales el balance de potencia alcanza valores positivos de 100 W, sin embargo, estos son muy poco frecuentes a lo largo del año.

**Figura 49**

*Balance de potencia del sistema basado en FLC*



### **Análisis de resultados**

Mediante la segunda sección de simulaciones se obtienen los resultados que buscan comparar el desempeño del sistema mediante el uso de las dos estrategias de gestión de energía basadas en control heurístico y FLC. Los resultados generales de las simulaciones permiten dar una visión general del comportamiento del sistema para cada caso. El resumen de los resultados se muestra en Tabla 26.

**Tabla 26**

*Resultados para un año de dos casos de estudio*

<b>Parámetros</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>
Motor a diésel	OC95-E2	OC60-E2

Consumo de combustible total [gal]	1.6036x10 <sup>3</sup>	2.4136x10 <sup>3</sup>
Emisiones de CO2 totales [ton CO2]	16.0361	24.14
Potencia desperdiciada total [kW]	292.4	138
Reducción de potencia desperdiciada comparada con el Caso 1 [%]	87.84	94.27

---

De los resultados generales que comparan ambas estrategias puede verse una clara diferencia con respecto a la velocidad de giro del motor, dado que se encuentra directamente relacionada al perfil de potencia del generador a diésel resultante de las estrategias de control. Además, se puede observar un incremento en el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>, al igual que en la primera sección de simulaciones se realiza un cambio en el motor a diésel acoplado al generador de modo que su capacidad de generación sea inferior dado que el perfil de potencia que debe generar presenta valores máximos que son menores debido al uso de la estrategia basada en FLC.

Puede observarse en las simulaciones realizadas que cada vez que se realiza un cambio del motor a diésel a uno de menor capacidad que se adapte al nuevo perfil de potencia, el consumo de combustible y emisiones aumenta como consecuencia. Sin embargo, debido al comportamiento propio de los motores a diésel descrito en la sección de análisis de resultados de la Sección 5.1, el mantener un mismo tipo de motor para los casos de estudio desarrollados hace que su consumo de combustible sea

incluso mayor. Esto es debido a los perfiles de potencia cada vez menores que se obtienen lo que hace que se alejen del valor nominal para el motor por lo cual el valor de consumo incrementa notablemente.

De los resultados generales, el valor que más destaca es la potencia residual o desperdiciada del sistema luego de su uso dentro del sistema de almacenamiento con la cual se obtiene una reducción del 94.27% comparada con el caso en el que se utiliza únicamente un generador a diésel. Esto representa un ahorro superior incluso mediante el uso de la estrategia basada en control heurístico, lo que implica un uso más eficiente de la energía que es generada en exceso dentro del sistema de generación híbrido planteado.

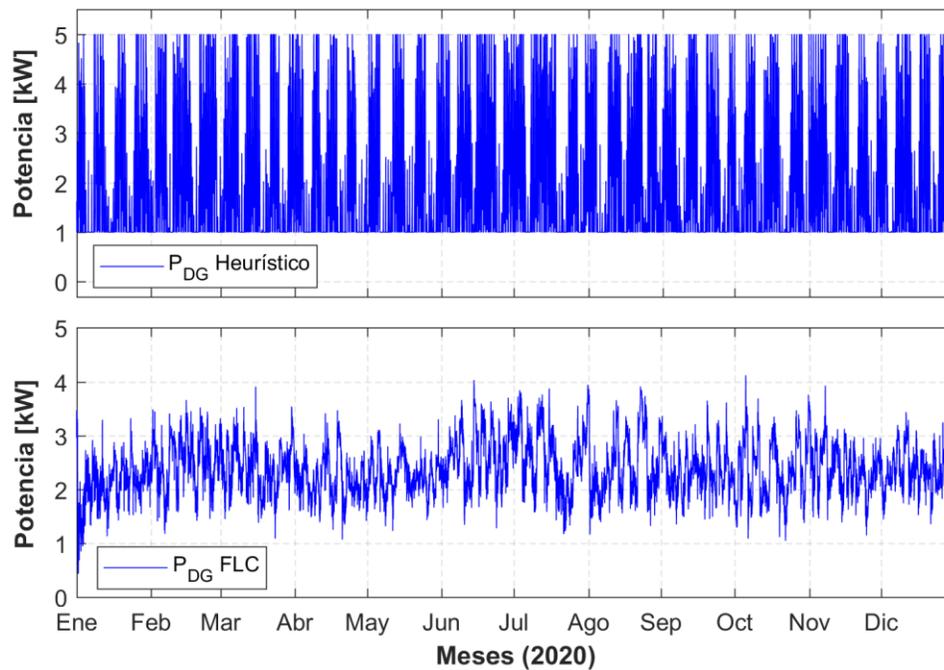
Una de las principales diferencias en el uso de las dos estrategias de control para el EMS se encuentra en el perfil de potencia del generador a diésel que es generado para cada caso, como se observa en Figura 50. Para el caso del control heurístico, el perfil que es generado para ser usado como referencia en la operación del generador a diésel presenta cambios repentinos para lograr seguir los valores de  $P_{LG}$  al aumentar el consumo de las cargas. Estos cambios pueden ir desde saltos pequeños hasta aquellos que van desde 1 a 5 kW, límites establecidos mediante el bloque de saturación dentro de la simulación. La principal desventaja de este tipo de comportamiento se encuentra en la capacidad de seguimiento a la referencia del controlador el cual tiene que proporcionar señales de control mucho mayores para poder cumplir con este objetivo, sin mencionar que el generador a diésel está en constante y repentinamente cambio de velocidad para adaptarse al perfil generado.

Por otro lado, mediante el uso de la estrategia de control basada en FLC y mediante la inclusión de un bloque de filtrado por Moving Average se consigue que este perfil sea mucho más suave y adaptado a las necesidades de potencia del sistema en

todo momento. La potencia máxima de generación es inferior al primer caso, lo que hace que el seguimiento a la referencia del controlador sea más sencillo y evita posibles fallos o sobreesfuerzos del generador a diésel durante su operación. Además, presenta la característica de que es posible utilizar un generador de menor capacidad como se mencionó en secciones anteriores.

**Figura 50**

*Comparación de los perfiles de potencia del generador a diésel elaborados con las dos estrategias de control*



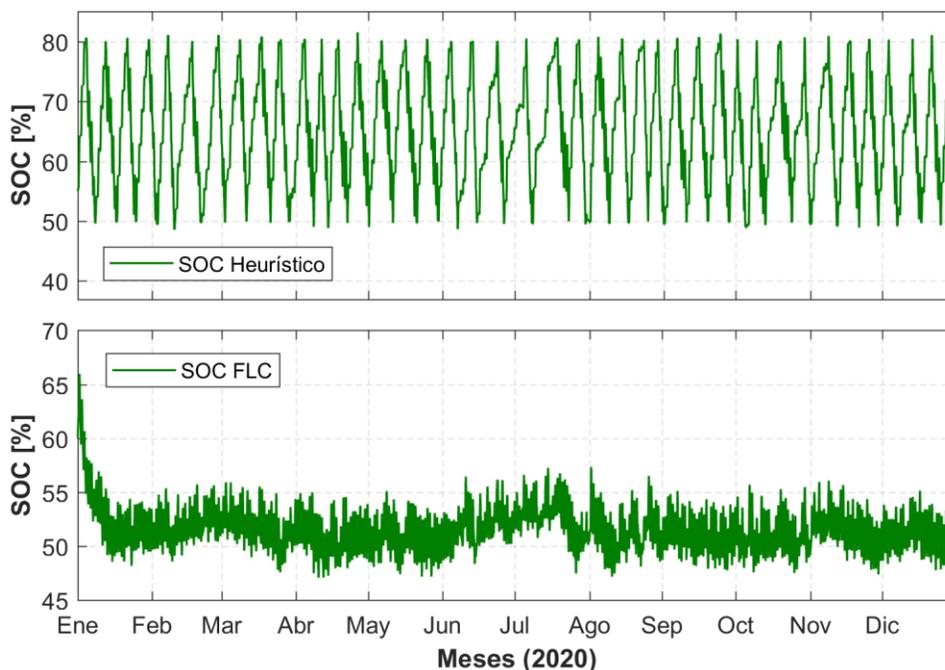
De igual forma se observa un cambio significativo en la evolución del SOC durante el año de estudio, cuyos resultados se muestran en Figura 51. Para el caso del sistema que usa la estrategia basada en control heurístico, debido a las reglas propuestas para su simulación se observa que el valor de SOC se encuentra dentro del

rango de 50 a 80% hasta alcanzar constantemente los límites máximo y mínimo impuestos a medida que se realizan los procesos de carga/descarga en la batería.

Para el caso del sistema con EMS basado en FLC el SOC intenta seguir la referencia del 60%. Sin embargo, sus valores se encuentran alrededor del 50 y 55% como consecuencia de la inclusión del control en lazo cerrado, lo que hace que este valor no caiga fuera de los límites seguros para la batería. Si bien se observa que, en el primer caso, los valores de SOC se encuentran dentro de los límites debido a las restricciones impuestas, esto también hace que durante los periodos de tiempo en los cuales se produce la carga de la batería se restrinja por completo la entrega de energía al sistema y viceversa. Esto a su vez contribuye a un mayor uso del generador a diésel, aspecto que es mejorado mediante el uso de la segunda estrategia, dado que se establecen previamente los valores límites durante el diseño de la base de reglas del control fuzzy y se implementa un control en lazo cerrado. La batería bajo esta estrategia constantemente realiza procesos de carga o descarga en base a las necesidades del sistema lo que aporta un uso más inteligente de este elemento para abastecer de potencia a las cargas.

**Figura 51**

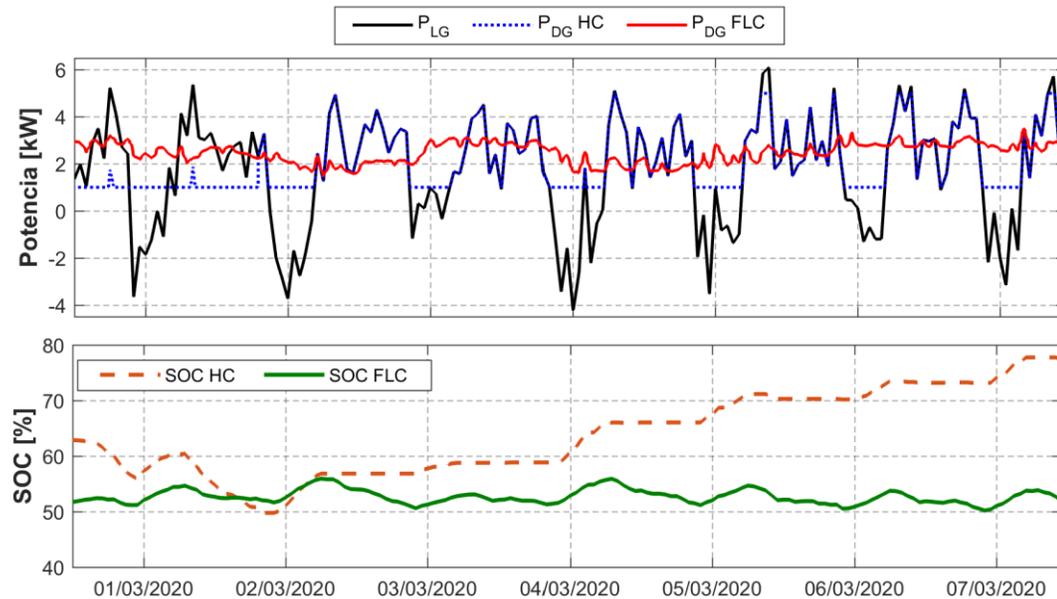
*Comparación del estado de carga de la batería, obtenido como resultado del uso de las dos estrategias de control*



Por último, en Figura 52 se muestra la evolución en el comportamiento del sistema para siete días consecutivos, donde se observan los valores de  $P_{LG}$ , que permite ver la relación entre el consumo y la generación de potencia. Se grafican los resultados de los perfiles generados mediante la estrategia de control basada en control heurístico (línea punteada azul) y mediante la estrategia basada en FLC (línea roja continua), además de la evolución del SOC con estas dos estrategias. Para el primer caso se observa de forma conjunta que en el instante en el cual la batería comienza su proceso de carga, el generador a diésel se convierte en la fuente de generación principal el cual trata de seguir la referencia de los valores positivos de  $P_{LG}$  hasta un mínimo de 1kW. De forma contraria, cuando la batería se encuentra en proceso de descarga el generador funciona al valor mínimo especificado.

**Figura 52**

*Evolución en el comportamiento del sistema con EMS basado en control heurístico y basado en FLC*



El comportamiento del perfil del generador a diésel para el primer caso se debe principalmente a que la estrategia utilizada trabaja únicamente con el valor actual de  $P_{LG}$ , por lo cual se ve forzada a seguir esta referencia. Esto da como resultado valores de referencia con cambios repentinos que se ven reflejados en los cambios de velocidad del generador. Para el segundo caso que además de incluir un bloque de filtrado que calcula el valor promedio de las últimas 24 horas, también tiene un bloque de derivación del valor promedio de  $P_{LG}$ . Este bloque permite obtener una predicción local de las necesidades de potencia en el sistema la cual hace que en periodos de tiempo en que el consumo aumenta, la generación a diésel también lo haga.

De manera contraria al aumentar la potencia de generación, el generador a diésel disminuye la generación en el mismo sentido, comportamiento que se observa en el SOC de la batería del segundo caso. Donde se observa que la batería se carga al

aumentar la generación y se descarga cuando el consumo aumenta, por lo cual en varios escenarios la batería se vuelve la fuente principal de generación adaptándose a la potencia necesaria en la carga debido a su rapidez y facilidad que tiene este almacenador de realizar estos cambios y compensa el esfuerzo extra que tendría el generador a diésel para adoptar un comportamiento similar.

De este modo mediante el uso de la estrategia basada en FLC se puede observar que el perfil de potencia del generador a diésel es suavizado, lo cual mejora el seguimiento a la referencia por parte del controlador y evita cambios repentinos de velocidad en el motor a diésel acoplado al generador. Además, se otorga al sistema de una capacidad de predicción a corto plazo con la cual se busca adaptar la generación a las necesidades de potencia en todo momento.

## Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

- Mediante el uso de la simulación y modelamiento matemático de máquinas se consigue la elaboración de un sistema de generación y almacenamiento híbrido compuesto por un generador a diésel, generador fotovoltaico, almacenador eléctrico y térmico. Estos elementos funcionan bajo el control de un sistema de gestión de energía (EMS) basado en una estrategia de control, con el objetivo de proveer de energía a una comunidad aislada del Ecuador.
- El algoritmo para el cálculo de la velocidad óptima de giro del motor a diésel acoplado al generador tiene la función de establecer una referencia de velocidad y torque para el motor en función de la potencia que se requiera generar dentro del sistema. De este modo se logra una reducción significativa del consumo BSFC en comparación con su uso a velocidad constante todo el tiempo, dado que la velocidad del motor se adapta al consumo en cada instante de tiempo.
- De la comparación de los primeros casos de estudio que involucran el uso de únicamente un generador a diésel, y el sistema de generación y almacenamiento híbrido propuesto, se evidencia una clara mejora en la cantidad de energía que es desperdiciada con el uso del sistema híbrido. Además, se propone un beneficio extra a la comunidad al brindar un sistema que es capaz de entregar agua caliente al utilizar la potencia excedente del sistema. Sin embargo, el consumo de combustible y de emisiones de CO<sub>2</sub> se ve incrementado.

- De la comparación de los segundos casos de estudio que involucran el uso de una estrategia de control basada en control heurístico y una estrategia basada en FLC, se observa que ambas estrategias realizan el abastecimiento de energía de forma constante para las cargas propuestas. Además, se consigue incrementar la vida útil del almacenador eléctrico (baterías) al realizar su control en base a los límites seguros de SOC establecidos para una batería de litio simulada en el presente trabajo.
- Mediante el uso de la estrategia basada en FLC se consigue la suavización del perfil de potencia del generador a diésel lo cual presenta mejoras sobre todo en el seguimiento a la referencia por parte del controlador, dado que no se producen cambios repentinos en la velocidad del motor a diésel lo que implica un menor esfuerzo del mismo a diferencia del primer caso.
- La utilización de la estrategia basada en FLC en conjunto con un bloque de derivación del valor promedio de las últimas 24 horas de  $P_{LG}$ , cuyos valores son utilizados como entrada del control fuzzy, permite que el sistema cuente con una predicción local de las necesidades de potencia del sistema. Esto hace que el EMS pueda tomar decisiones acerca del uso de la batería y también disminuir la dependencia del sistema al generador a diésel como elemento principal, como sucede en el primer caso.
- A diferencia del primer caso de estudio que utiliza solo un generador diésel, al incorporar el sistema de generación y almacenamiento híbrido bajo el control de un EMS se evidencia una clara reducción de la energía desperdiciada. Se alcanza un valor 87.84% para la estrategia basada en control heurístico y de 94.27% para la estrategia basada en FLC.

- La implementación de este sistema junto con sus estrategias de control permite disminuir el valor máximo de potencia requerida por el generador a diésel: 5 kW para el control heurístico y 4.12 kW para FLC, en comparación a 6.96 kW del primer caso de estudio.
- Como resultado de la reducción de la potencia máxima en el perfil del generador a diésel mediante el uso de cada una de las estrategias de control, es posible reducir la capacidad de generación del mismo para cada caso. Esto representa un ahorro en espacio y en costos al utilizar máquinas mas pequeñas. Sin embargo, debido al comportamiento propio del motor a diésel descrito a través de sus curvas de funcionamiento esto hace que se produzca a su vez un incremento en el consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Con respecto al SOC de la batería, mediante el uso de ambas estrategias de control se consigue que los niveles se mantengan dentro de los límites considerados como seguros para este tipo de batería debido a la base de reglas establecida para cada caso. Sin embargo, con el uso de la estrategia basada en FLC se obtienen resultados más estables dado que se utiliza un control en lazo cerrado para mantener el SOC alrededor a un valor de referencia por lo cual constantemente se realizan procesos de carga o descarga para adaptarse a las necesidades de potencia del sistema. Comportamiento que difiere con la estrategia basada en control heurístico en la cual los valores de SOC oscilan entre los límites determinados, a través de procesos de carga en los cuales no puede utilizarse la potencia almacenada y procesos de descarga en los cuales se corta el suministro de potencia hacia la batería.

## Recomendaciones

- Para la elaboración de los perfiles de consumo de una comunidad aislada se requiere de un estudio previo de la situación social, económica y geográfica de la localidad, además de datos de consumo reales de varios dispositivos utilizados dentro de una vivienda con el fin de realizar una simulación de consumo que intente asemejarse a la real.
- Para la generación de datos de consumo, así como para la adquisición de datos meteorológicos de una determinada zona, se deben utilizar tiempos de muestreo pequeños que pueden ser de hasta una hora o inferiores. De este modo se tiene una actualización constante de las condiciones climáticas y de consumo que permitan tomar decisiones rápidas y sin retardos. Sin embargo, un tiempo de muestreo pequeño implica un aumento en el gasto computacional y el uso de equipos con una mayor velocidad de procesamiento.
- Las reglas de control para cada una de las estrategias realizadas deben estar basadas en las características y limitaciones propias de los elementos involucrados, de modo que contribuyan a un funcionamiento seguro con proyección a su uso dentro de un sistema real. Para el caso de la base de reglas y configuración de las funciones de membresía del control fuzzy, estas son sintonizadas de forma manual para conseguir el mejor desempeño del controlador dentro del sistema.
- Para el caso de las estrategias de control a utilizarse dentro del EMS se recomienda incorporar técnicas de predicción para variables como irradiación solar o temperatura e incluso consumo de potencia, cuya principal ventaja consiste en la reducción de retrasos en los datos para la realización de

cálculos. Los retardos suelen afectar principalmente en la toma de decisiones y eliminándolos se evita depender de la actualización constante de datos.

### **Reconocimientos**

Este trabajo es parte del proyecto 2020-EXT-007 “MIRA-ESTE: Specific, innovative microgrids solutions (accounting for environmental, social, technological and economic aspects) for isolated rural areas of Ecuador” desarrollado en conjunto con la Universidad KU Leuven (Bélgica) con el financiamiento del Consejo Interuniversitario Flamenco (VLIR-UOS) y la Agencia de Cooperación Belga para el Desarrollo (DGD) con el proyecto EC2020SIN322A101.

### **Bibliografía**

Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2017). *Estadística anual y multianual del sector eléctrico ecuatoriano*. Quito: ARCONEL.

Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2018). *Estadística anual y multianual del sector eléctrico ecuatoriano*. Quito: ARCONEL.

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2020). *Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano*. Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ACR).

Agencia Internacional de la Energía (AIE). (2021). *Acceso a la electricidad (% de la población)*. (Banco Mundial) Recuperado el 18 de Junio de 2021, de <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS>

Agencia Internacional de la Energía (AIE). (2021). *Producción de electricidad a partir de fuentes de petróleo, gas y carbón (% del total)*. (Banco Mundial) Recuperado el 18 de Junio de 2021, de <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.FOSL.ZS>

Alvarado, J. (31 de Diciembre de 2019). Área de la Península tiene un gran potencial para la generación de energía fotovoltaica. *Expreso*. Obtenido de

<https://www.expreso.ec/actualidad/area-peninsula-gran-potencial-generacion-energia-fotovoltaica-2384.html>

- Anuphappharadorn, S., Sukchai, S., Sirisamphanwong, C., & Ketjoy, N. (2014). Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application. *Energy Procedia*, 56, 352-358.
- Arcos, D., Pascual, J., Guinjoan, F., Marroyo, L., Sanchis, P., & Marietta, M. (2017). Low complexity energy management strategy for grid profile smoothing of a residential grid-connected microgrid using generation and demand forecasting. *ELSERVIER*(205), 69-84.
- Arcos-Aviles, D., Guinjoan, F., Pascual, J., Marroyo, L., Sanchis, P., Gordillo, R., . . . Marietta, M. (2019). A Review of Fuzzy-Based Residential Grid-Connected Microgrid Energy Management Strategies for Grid Power Profile Smoothing. En *Energy Sustainability in Built and Urban Environments* (págs. 165-199). Singapore: Springer.
- Arcos-Aviles, D., Pascual, J., Marroyo, L., Sanchis, P., & Guinjoan, F. (2016). Fuzzy Logic-Based Energy Management System Design for Residential Grid-Connected Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 530-543. doi:<https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2555245>
- Bin, M., Shaidul, K., & Adbus, D. (2019). Modelling and Optimization of Hybrid Power System at Coastal Area. En IEEE (Ed.), *International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*. Cox'sBazar.
- Bull, S. (2001). Renewable Energy Today and Tomorrow. *Proceedings of the IEEE*, 89(8), 1216-1226.
- Burns, R. (2001). *Advanced Control Engineering*. Oxford: ELSEVIER. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5100-4.X5000-1>
- Damen, A., & Weiland, S. (2002). *Robust Control*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
- Etxeberria, A., Vechiu, I., Camblong, H., & Vinassa, J. (2011). Comparison of Sliding Mode and PI Control of a Hybrid Energy Storage System in a Micrgrid Application. *Energy Procedia*, 12, 966-974.

- Goodenough, J., & Yoshino, A. (Octubre de 2019). Lithium-Ion Batteries. *The Royal Swedish Academy of Sciences*. Obtenido de <https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-chemistryprize2019.pdf>
- Granda, E., Orta, O., Díaz, J., Jimenez, M., Osorio, M., & González, M. (2013). Modelado y simulación de celdas y paneles solares. *Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica*. 35, págs. 17-22. Chihuahua: Memoria Electro.
- Haro, L., & Oscullo, J. (2016). Factor Anual de Emisión de CO<sub>2</sub> Producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, Mediante la Aplicación de la Metodología de la Convención Marco Sobre el Cambio Climático UNFCCC, para el Periodo 2009-2014. *Revista Politécnica*, 37(1).
- Huang, N., & Cheek, K. (2007). Applied heuristic optimal control. *International Journal of Control*, 58(5), 1081-1103.
- Iglesias, R., Lago, A., Noguieras, C., Martínez, C. P., Marcos, J., Quintans, C., . . . Valdés, M. (2021). Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda. *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI 2012)*. Vigo: Universidad de Vigo.
- INEC. (2010). *Resultados del Censo 2010 de población y vivienda en el Ecuador*. Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- Jiang, J., Shi, W., Zheng, J., Zuo, P., Xiao, J., Chen, X., . . . Zhang, J.-G. (2014). Optimized Operating Range for Large-Format LiFePO<sub>4</sub>/Graphite Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 161(3), 336-341.
- Jiménez, D., & Rivas, E. (2018). *Modelado y simulación de un sistema de generación de energía eléctrica a base de diésel*. Ciudad Universitaria: Universidad de El Salvador.
- Karakosta, C., Pappas, C., Marinakis, V., & Psarras, J. (2013). Renewable energy and nuclear power towards sustainable development: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 187-197.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.035>
- Lata-García, J., Reyes-Lopez, C., Jurado, F., Fernández-Ramírez, L., & Sanchez, H. (2017). Sizing optimization of a small hydro/photovoltaic hybrid system for

- electricity generation in Santay Island, Ecuador by two methods. *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, (págs. 1-6). Chile.
- Liu, Y., Yu, S., Zhu, Y., Wang, D., & Liu, J. (2018). Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(2018), 460-470.
- López, D., Yahyaoui, I., Tadeo, F., & Arnaltes, S. (2019). On the Energy Management for a Stand-Alone Hybrid System in Isolated Area. En IEEE (Ed.), *10th International Renewable Energy Congress (IREC)*. Sousse.
- López, J. (2015). *Sistemas de almacenamiento de energía a partir de bancos de baterías para la integración de fuentes de energía renovables en microrredes en DC*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Mantilla, J., & Casallas, M. (2015). Diseño de un tanque de almacenamiento de agua caliente sanitaria, utilizando materiales de bajo costo. *Scientia et Technica*, 20(3), 225-233.
- Merchán, D. (2021). Rentabilidad de la implementación de paneles fotovoltaicos en relación con el consumo promedio por vivienda en las 4 regiones naturales del Ecuador. *Conciencia Digital*, 4(3), 22-39.  
doi:<https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i3.1762>
- Morales, F. (2010). *Algoritmo de control en sistema de generación Diésel de velocidad variable utilizando convertor matricial de cuatro piernas*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.
- Paredes, L. (2009). *Modelación y simulación de un sistema de generación Diésel de velocidad variable*. Punta Arenas: Universidad de Magallanes.
- Pascual, J., Sanchis, P., & Marroyo, L. (2014). Implementation and Control of a Residential Electrothermal Microgrid Based on Renewable Energies, a Hybrid Storage System and Demand Side Management. *Energies*, 7, 210-237.
- Pigueiras, E. (2005). *Energy Collected and Delivered by PV Modules*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. doi:10.1002/0470014008.ch20

- Porras, A. (2018). *Modelización matemática de una batería de uso espacial*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Quintero, V., Che, O., Ching, E., Auciello, O., & de Obaldía, E. (2021). Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones. *Revista de I+D Tecnológico*, 17(1). Obtenido de <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/339/3392002003/index.html>
- Rodríguez, E. (2015). *Almacenamiento de energía térmica por calor latente en los edificios: bases para la optimización de aplicaciones pasivas, opacas y translúcidas*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Severino, B. (2011). *Modelación de generador fotovoltaico y banco de baterías de plomo ácido como elementos de una microrred*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Soto, M. (2017). *Evaluación de desempeño de un grupo electrógeno con carga variable*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Tephiruk, N., Kanokbannakorn, W., Kerdphol, T., Mitani, Y., & Hongesombut, K. (2018). Fuzzy Logic Control of a Battery Energy Storage System for Stability Improvement in an Islanded Microgrid. *Sustainability*, 10(5).
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198-1208.
- Zaim, Z., Soediby, & Ashari, M. (2019). Penetration of Photovoltaic - Synchronous Diesel Generator System without Storage for Isolated Area. En IEEE (Ed.), *International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering (ICOMITEE)*. Jember.
- Zapata, A., & Santos, M. (2015). Modelo y Simulación de un Sistema Fotovoltaico Portátil. *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*, (págs. 609-615). Bilbao.
- Ziritt, J., López, P., & Novillo, R. (2012). *Petróleo en Cifras*. Quito: AIHE.

## Anexos