

Dimensionamiento de Microrredes Considerando Análisis de Ciclo de Vida

Ing. Iván Edgardo Jiménez Vargas

Trabajo de Grado para Optar el Título de Magíster en Ingeniería Eléctrica

Director

German Alfonso Osma Pinto

Doctor en Ingeniería – Área Ingeniería Eléctrica

Codirector

Juan Manuel Rey

PhD. en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Maestría en Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Ita.

Agradecimientos

Agradezco enormemente a German y Juan por la paciencia, los consejos y el apoyo incondicional.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS.....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MARCO REFERENCIAL.....	20
2.1 ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES	20
2.1.1 <i>Dimensionamiento óptimo.</i>	21
2.1.2 <i>Impacto ambiental de las microrredes.</i>	22
2.2 METODOLOGÍA	23
3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA E INDICADORES DE IMPACTO	
AMBIENTAL.....	26
3.1 METODOLOGÍA DE ACV: RECiPE v1.1.....	27
3.2 INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL	29
3.2.1 <i>Impacto ambiental de los sistemas fotovoltaicos</i>	31
3.2.2 <i>Impacto ambiental de las turbinas eólicas</i>	32
3.2.3 <i>Impacto ambiental de los sistemas de baterías de litio</i>	33
3.2.4 <i>Impacto ambiental de la generación diesel</i>	33
3.3 FUNCIÓN OBJETIVO	34
3.3.1 <i>Función objetivo: sistema fotovoltaico</i>	36
3.3.2 <i>Función objetivo: turbinas eólicas</i>	38

3.3.3 <i>Función objetivo: sistema de baterías</i>	39
3.3.4 <i>Función objetivo: generación diesel</i>	41
3.3.5 <i>Expresión final</i>	41
4. FORMULACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO CONSIDERANDO ACV.....	43
4.1 FUNCIÓN MULTIOBJETIVO	44
4.2 RESTRICCIONES.....	47
4.2.1 <i>Balance de potencia</i>	47
4.2.2 <i>Límites de potencia del generador diesel</i>	48
4.2.3 <i>Carga/descarga de la batería</i>	48
4.2.4 <i>Estado de carga</i>	49
4.2.5 <i>Cantidad de Componentes</i>	50
4.3 <i>ENERGY MANAGEMENT STRATEGY</i> Y DESPACHO.....	50
4.4 MODELOS MATEMÁTICOS.....	51
4.4.1 <i>Turbinas Eólicas</i>	52
4.4.2 <i>Generador Fotovoltaico</i>	52
4.4.3 <i>Sistema de Baterías</i>	53
4.4.4 <i>Generador Diesel</i>	53
4.4 VALORES DE LOS PARÁMETROS Y PERFILES.....	54
4.4.1 <i>Perfiles de carga y recursos energéticos</i>	54
4.4.2 <i>Parámetros económicos</i>	56
4.4.3 <i>Parámetros técnicos</i>	56
5. IMPACTO DEL ACV EN EL DIMENSIONAMIENTO	58
5.1 SOLUCIÓN ECONÓMICA Y SOLUCIÓN AMBIENTAL.	58

5.2 FRENTE DE PARETO E INDICADORES DE DESEMPEÑO	61
5.3 COMPOSICIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN EL FRENTE DE PARETO	66
5.4 ENFOQUE PROPUESTO VS. ENFOQUE BASADO EN SOLO GWP.....	68
5.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	69
6. CONCLUSIONES.....	71
7. REFERENCIAS.....	74

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Categorías de impacto ambiental asociadas al área de protección de ecosistemas y sus unidades de medida estándar según ReCiPe.</i>	30
Tabla 2 <i>Indicadores de impacto ambiental de la generación de 1 kWh de energía fotovoltaica según Vega y Zaror (2018).</i>	31
Tabla 3 <i>Impacto ambiental por cada kWh de capacidad de baterías de litio tipo NCM, según Sun et al. (2020).</i>	33
Tabla 4 <i>Impacto ambiental por litro de diesel consumido, según Sothea & Kim Oanh (2019) y el Gobierno de Canadá.</i>	34
Tabla 5 <i>Valores de los factores de transformación de punto medio a punto final. Tomado de (National Institute for Public Health and the Environment, 2017).</i>	35
Tabla 6 <i>Valores para el cálculo del coeficiente de la función impacto ambiental para los sistemas fotovoltaicos.</i>	37
Tabla 7 <i>Valores para el cálculo del coeficiente de la función impacto ambiental para la generación eólica.</i>	39
Tabla 8 <i>Valores para el cálculo del coeficiente de la función impacto ambiental para el sistema de baterías.</i>	40
Tabla 9 <i>Valores para el cálculo del coeficiente de la función impacto ambiental para la generación diesel.</i>	41
Tabla 10. <i>Parámetros económicos para las especificaciones del problema.</i>	56
Tabla 11 <i>Parámetros técnicos para las especificaciones del problema.</i>	56

Tabla 12 Indicadores de desempeño para la SE y la SA del problema de dimensionamiento.

..... 58

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Fases del desarrollo de la investigación.</i>	24
Figura 2.	26
Figura 3 <i>Revisión de las categorías de impacto y su relación con las áreas de protección cubiertas por el ReCiPe. Tomado de RIVM (2017).</i>	29
Figura 4. <i>Esquema que resume el proceso de dimensionamiento.</i>	43
Figura 5 Perfil de carga en por unidad durante 50 horas del periodo de evaluación.	55
Figura 6 Perfiles de radiación solar, temperatura y velocidad del viento para dos días. ..	55
Figura 7. Distribución de la potencia generada y carga de la SE para una semana.	60
Figura 8 Distribución de la potencia generada y carga de la SA para una semana.	60
Figura 9 Frente de Pareto y ajuste exponencial de los puntos del frente.	61
Figura 10 Variación porcentual relativa del ESI respecto al ESI de la SE para todas las soluciones del frente.	63
Figura 11 Confiabilidad expresada en términos del LPSP de las soluciones del frente. ..	64
Figura 12 Energía total perdida (TEL) de cada solución del frente.	64
Figura 13 Consumo del combustible diesel para cada solución del frente.	65
Figura 14 Fracción de energía generada por renovables para cada solución del frente. ..	65
Figura 15 Soluciones del frente de Pareto con el impacto ambiental discriminado por tipo de impacto.	66
Figura 16 Soluciones del frente de Pareto con el impacto ambiental discriminado por el impacto de cada tecnología.	67

Resumen

Título: Dimensionamiento de Microrredes considerando Análisis de Ciclo de Vida *

Autor: Iván Edgardo Jiménez Vargas **

Palabras Clave: Análisis de Ciclo de Vida, Dimensionamiento Óptimo, Energías Renovables, Generación Distribuida, Impacto Ambiental, Microrredes.

Descripción: La degradación del medio ambiente y los ecosistemas es motivo de preocupación en todo el mundo. Para hacerles frente, se requieren acciones en todas las áreas del conocimiento que ayuden a generar condiciones para mitigar el impacto negativo que ocasionan las actividades humanas. En ese sentido, el propósito de este trabajo de investigación es incorporar una visión ambientalista en la forma que se hace el dimensionamiento de los recursos energéticos en una microrred (MG), a través de la integración de indicadores de impacto ambiental (IIA) en el problema del dimensionamiento.

Con ello, se busca que la mejor combinación de recursos se determine conjuntamente desde los enfoques técnico, económico y ambiental. Inicialmente, se seleccionan indicadores de impacto ambiental según las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida aplicables al contexto de las microrredes. Seguidamente, se integran estos indicadores en la función de objetivo del problema de optimización típica de una MG, así como la definición del conjunto de restricciones. Finalmente, la estrategia propuesta se aplica a una MG conformada por sistemas fotovoltaicos, turbinas eólicas, almacenamiento con baterías y generación diesel. Se estudia la incidencia de las consideraciones ambientales en el dimensionamiento puramente económico, a través de la comparación de este escenario con un escenario de referencia.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: German Alfonso Osma Pinto. Doctor en Ingeniería – Área Ingeniería Eléctrica. Codirector: Juan M. Rey, PhD. en Ingeniería Electrónica.

Abstract

Title: Sizing of Microgrids considering Life Cycle Analysis *

Author: Iván Edgardo Jiménez Vargas **

Key Words: Microgrids, Optimal Sizing, Life Cycle Analysis (LCA), Renewable Energy, Distributed Generation, Environmental Impact

Description: The degradation of the environment and ecosystems is of concern around the world. To face them, actions are required in all areas of knowledge that help generate conditions to mitigate the negative impact caused by human activities. In this sense, the purpose of this research work is to incorporate an environmental vision in the way that the dimensioning of energy resources in a microgrid (MG) is done, through the integration of environmental impact indicators (IIA) in the sizing problem.

With this, it is sought that the best combination of resources is jointly determined from the technical, economic, and environmental approaches. Initially, environmental impact indicators are selected according to the Life Cycle Analysis methodologies applicable to the context of microgrids. These indicators are then integrated into the objective function of the typical optimization problem of a MG, as well as the definition of the set of restrictions. Finally, the proposed strategy is applied to a MG made up of photovoltaic systems, wind turbines, storage with batteries and diesel generation. The incidence of environmental considerations in the economic sizing is studied by comparing this scenario with a reference scenario.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: German Alfonso Osma Pinto. Doctor en Ingeniería – Área Ingeniería Eléctrica. Codirector: Juan M. Rey. PhD. en Ingeniería Electrónica.

Introducción

El deterioro del medio ambiente es una problemática ineludible que compete a todos los seres humanos y sobre la que hay que tomar acciones inmediatas. Para hacer frente a esta y otras problemáticas, los líderes mundiales, reunidos en la Organización de las Naciones Unidas (ONU), fijaron un conjunto de diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con el fin de “erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos” (Organización de las Naciones Unidas, 2015c). El séptimo ODS, llamado Energía Asequible y No Contaminante, es particularmente relevante, pues la energía está presente en casi todos los aspectos de la vida moderna.

El séptimo ODS plantea que es vital “aumentar el uso de fuentes renovables para crear comunidades más sostenibles e inclusivas” (Organización de las Naciones Unidas, 2015b), mientras que el decimotercer ODS exhorta a los países a “tener actividades económicas más sostenibles y amigables con el medio ambiente” (Organización de las Naciones Unidas, 2015a). Estos planteamientos conducen a reflexionar sobre la importancia y necesidad de integrar requerimientos ambientales en las formas en las que se ejecutan todos los procesos propios de los proyectos de ingeniería. Así, se establece una necesidad: incluir requerimientos y análisis de impactos ambientales en los proyectos de ingeniería.

El área de la energía eléctrica juega un papel determinante en la consecución de estos ODS, debido a la demanda creciente por energía eléctrica segura, confiable y sostenible (IEA, 2019). Sin embargo, algunos escenarios planteados por la Agencia Internacional de Energía señalan que para el año 2040 más del 70% de la energía será producida por fuentes fósiles (International Energy Agency, 2018), mientras que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) seguirían

aumentando por encima de los máximos históricos, empeorándose el cambio climático (Organización de las Naciones Unidas, 2019; Saheb Koussa & Koussa, 2016).

En este contexto, las soluciones que aporten para reducir las emisiones de GEI y otros IAs son determinantes para la consecución del desarrollo sostenible. Una de estas soluciones es la microrred eléctrica (MG), una pequeña red de distribución autosuficiente y autogestionada, capaz de operar de manera independiente del sistema de energía eléctrica convencional o inmerso en este (Llano, 2015; Shah Danish et al., 2019; Vergara et al., 2019). Desde el punto de vista técnico, las MGs tienen una mayor capacidad para integrar recursos energéticos distribuidos (REDs) renovables y hacer de las redes sistemas más inteligentes y eficientes (Bahrami & Mohammadi, 2019; Naderi et al., 2018; Vergara et al., 2019), lo que las hace un medio adecuado para hacer frente al impacto producido por los sistemas eléctricos en el cambio climático.

Las MGs son importantes también desde un punto de vista social. En un territorio como el colombiano, caracterizado por su topografía accidentada y muchas veces inaccesible, existen asentamientos rurales sin posibilidad de acceso al Sistema Interconectado Nacional (SIN), en lo que se llama Zonas No Interconectadas (ZNI). Aunque estas zonas no representan más del 10% de la demanda total de energía de Colombia (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2013), es un deber del Estado brindar soluciones energéticas para esta población, pues la energía es un medio necesario para el desarrollo de estas poblaciones y el cierre de brechas socioeconómicas. Así, las MGs aparecen como un medio para el desarrollo y la inclusión social.

La integración de grandes cantidades de generación renovable y almacenamiento no necesariamente implica una reducción del impacto ambiental (IA) total. Si bien la generación eólica y fotovoltaica o las baterías no provocan emisiones de GEI en su operación, el ciclo de

vida^{††} completo de estos sistemas tiene un costo ambiental que debe ser tenido en cuenta a la hora de cuantificar el IA de estas tecnologías (Baharwani et al., 2014; Rajaei & Tinjum, 2013). Así nace esta propuesta: el estudio de la reducción del IA de los sistemas de generación y almacenamiento, específicamente en el proceso de su dimensionamiento.

Si bien se han realizado estudios en los que se incluye el componente ambiental en MGs (Biswas et al., 2018; Kourkoumpas et al., 2018; Kumar et al., 2019; Liang et al., 2018; Narimani et al., 2018), se identificó que estos estudios toman, principalmente, dos enfoques: algunos solo evalúan el problema en la operación del sistema y otros se centran en reducir los IAs a las emisiones de CO₂ de los recursos no renovables. A partir de esta necesidad identificada, se plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿Cómo integrar el análisis de ciclo de vida y consideraciones de impacto ambiental en el proceso de dimensionamiento de microrredes usando técnicas de optimización matemática multiobjetivo?* A partir de esta pregunta de investigación, se derivó el siguiente objetivo general para este trabajo de investigación:

1. Proponer una estrategia de dimensionamiento de los recursos energéticos de una microrred, a partir de la inclusión de indicadores económicos y ambientales, con el fin de reducir el impacto ambiental en los ecosistemas, desde el punto de vista del análisis de ciclo de vida.

Esta propuesta aborda uno de los aspectos más importantes en una MG: su dimensionamiento, pues su desarrollo le da forma a la MG y está estrechamente relacionado con el ciclo de vida. El dimensionamiento se refiere a la determinación de las capacidades nominales de cada uno de los REDs que integran la MG, de acuerdo con uno o más objetivos. Este problema involucra etapas de planeación, operación, distribución y uso coordinado de la generación de

^{††} El ciclo de vida se refiere a todos los estadios por los que pasa un bien o servicio, desde su construcción hasta su destrucción, es decir, los procesos de manufactura, transporte, instalación operación y deposición.

energía (Nemati et al., 2018). Un enfoque para hacer el dimensionamiento es a través de la optimización matemática, que consta de una función objetivo, la cual representa matemáticamente el costo (o cualquier objetivo) de la MG y que, al ser minimizada (o maximizada), según algunas restricciones, arroja las capacidades nominales de los REDs, tal que se maximizan los beneficios o minimizan los impactos negativos (Wu et al., 2014).

El eje central de esta propuesta es intervenir el planteamiento del problema de dimensionamiento típico de una MG, particularmente en los objetivos del dimensionamiento, incluyendo las consideraciones de impacto ambiental, ya que este problema de optimización puede tener varios objetivos (Shi et al., 2015). Una forma de cuantificar el costo de una microrred es a través del Costo Presente Neto (NPC, por sus siglas en inglés) y que se usa habitualmente como función objetivo en el dimensionamiento económico de la microrred. Este costo se puede representar así así:

$$\text{NPC}(C_G, P_D) = -I_0(C_G, P_D) + \sum_{y=1}^N \frac{F_y(C_G, P_D)}{(1+i)^y}, \quad (1)$$

donde,

NPC representa el costo presente neto de la microrred. I_0 representa el costo de inversión inicial. F_y representa los flujos de caja en el año futuro y . N representa el número de años del análisis. i representa la tasa de descuento del proyecto. G representa el conjunto de REDs. C_G representa la capacidad nominal del conjunto G . P_D representa la potencia despachada por las fuentes despachables que componen G .

El problema de optimización puede tener diferentes objetivos (diferentes funciones objetivo pueden ser planteadas) y puede definirse de acuerdo con las preferencias de los usuarios, la disposición geográfica, los equipos instalados, la regulación gubernamental, tarifas, el

almacenamiento, la priorización de recursos, el costo ambiental, una combinación de estos, entre otros (Mahmoud & AL-Sunni, 2015), que pueden sumarse a la función descrita en (1) y formar una función bi-objetivo, que es lo que se plantea en este trabajo.

Si bien lo convencional es que el dimensionamiento se haga de acuerdo con criterios económicos (FU et al., 2014; Ma et al., 2018; Ren et al., 2016), la preocupación por el cambio climático y el desarrollo sostenible han llevado que se incluya el análisis de IA en las actividades de ingeniería. En el caso particular de esta propuesta de investigación se identificaron algunos estudios (Cai et al., 2010; Nagapurkar & Smith, 2019a; Nosratabadi et al., 2017; Sedighizadeh et al., 2019; Zhang et al., 2016) en los que se incluyen aspectos ambientales en el dimensionamiento.

Por citar dos ejemplos, se destaca el estudio de Jiuping *et al.* (2018), quienes propusieron un modelo de optimización multiobjetivo que considera, simultáneamente, emisiones de GEI, beneficios económicos y las restricciones propias de los generadores distribuidos (Xu et al., 2018). Otro caso es el presentado por Biswas *et al.* (2018), donde se formuló una estrategia multiobjetivo para la optimización de indicadores económicos y ambientales, cuya particularidad es el uso de técnicas estocásticas para la predicción de la generación y la formulación de escenarios (Biswas et al., 2018).

Sin embargo, los estudios con componente ambiental referidos solo incluyen como objetivo la reducción de emisiones de CO₂ durante la operación, lo cual no garantiza que se estudie todo el IA de los sistemas de generación. Una manera más completa de hacer este análisis es a través del análisis de ciclo de vida (Nagapurkar & Smith, 2019a) y la inclusión de indicadores complementarios, además de las emisiones (Kourkoumpas et al., 2018); de no ser así, se corre el riesgo de subestimar el impacto que una tecnología puede tener sobre el medio ambiente en cualquier punto de su ciclo de vida.

La investigación consta de cuatro grandes etapas: la revisión del estado del arte, la declaración de la función multiobjetivo, el dimensionamiento y el análisis de resultados. En primer lugar, se escogió como objeto de estudio la MG porque es ideal para experimentar con ideas que involucren concepciones ambientalistas relacionadas con la penetración de energías renovables ya que es un sistema independiente, menos complicado y más controlable que los sistemas de potencia convencionales. La metodología en la que se inspiró la cuantificación del IA de este trabajo se conoce como ReCiPe en su versión 2016, ya que es una de las metodologías para realizar análisis de ciclo de vida más populares, extendidas, actualizadas y mejor documentadas.

Del mismo modo, es importante recolectar del estado del arte los indicadores ambientales, las lecciones aprendidas y los aportes más significativos en materia de optimización en MGs con objetivos diversos distintos a la optimización económica, para poder construir el problema de optimización que interesa: la reducción del IA sin perjudicar radicalmente el costo del sistema.

La función objetivo planteada debe someterse a prueba. Por ello, la fase de análisis de resultados implica establecer y calcular el marco de referencia (dimensionamiento económico) y aplicar la optimización propuesta (dimensionamiento económico-ambiental), para luego, usar dos enfoques de comparación para establecer el impacto: uno técnico y uno económico. El enfoque económico se reduce al análisis de la variación del costo del sistema, mientras que el técnico se aborda desde la cuantificación de la confiabilidad.

Por lo tanto, esta propuesta se justifica en una necesidad derivada de la amenaza del cambio climático: transformar paulatinamente los análisis y procedimientos técnico-económicos de ingeniería, en procesos técnico-económico-ambientales, con el fin último de asumir la responsabilidad que tienen los proyectos de ingeniería en el cambio climático y emprender acciones para su mitigación. En particular, el aporte original de esta propuesta es la integración de

indicadores de IA (con enfoque holístico^{‡‡}) en el dimensionamiento de una MG, avanzándose en prácticas y propuestas con carácter ambiental, innovadoras y que examinan el IA como una constante en la generación de energía durante todo el ciclo de vida del proyecto

Finalmente, este trabajo de investigación se estructura así: el capítulo 1 presenta el objetivo general y los específicos. El capítulo 2 presenta el marco referencial, que incluye la revisión del estado del arte, los antecedentes, los trabajos relacionados y el marco teórico. El capítulo 3 presenta la selección de indicadores y la metodología de análisis de ciclo de vida. El capítulo 4 presenta la formulación del problema de dimensionamiento y su implementación. El capítulo 5 recoge los resultados de los análisis relacionados y su discusión. Finalmente, se presentan las conclusiones, observaciones, limitaciones, trabajo futuro y las referencias.

^{‡‡} Holístico se refiere a considerar las cosas como un todo. En ese sentido, el IA al que se refiere en todo este documento no solo se refiere a las emisiones de CO₂, sino las emisiones de otros GEI, contaminación y consumo de recursos como agua y energía en el ciclo de vida de las MGs.

1. Objetivos

Este trabajo de investigación se desarrolló de acuerdo con un objetivo general y cuatro objetivos específicos. A continuación, se presentan estos objetivos.

1.1 Objetivo General

- Proponer una estrategia de dimensionamiento de los recursos energéticos de una microrred, a partir de la inclusión de indicadores económicos y ambientales, con el fin de reducir el impacto ambiental en los ecosistemas, desde el punto de vista del análisis de ciclo de vida

1.2 Objetivos Específicos

La consecución del objetivo general se logra a través de la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar un conjunto de indicadores que describa el impacto ambiental del ciclo de vida de la generación de energía en una microrred, para su integración en el problema de optimización de dimensionamiento, a partir de la revisión de la literatura.
- Definir restricciones técnicas, económicas y ambientales para el problema de optimización, a partir de la revisión de la literatura.
- Formular una función multiobjetivo que incluya indicadores de impacto ambiental para el dimensionamiento económico-ambiental de una microrred con generación fotovoltaica, eólica, almacenamiento con baterías y generación diesel, a partir de los indicadores seleccionados y sujeta a las restricciones definidas.
- Analizar el impacto económico y ambiental en una MG debido al enfoque propuesto, tomándose como referencia el despacho económico.

2. Marco Referencial

En este capítulo se resaltan aquellos aspectos relacionados con el marco teórico en el que se inscribe el proyecto. Se resalta el estado del arte y algunos antecedentes asociados con la investigación. Asimismo, se presenta la metodología seguida para la consecución de los objetivos.

2.1 Estado del arte y antecedentes

Microrred (MG) es un concepto alternativo al concepto tradicional de sistema eléctrico, derivado del concepto de sistemas de energía híbridos. En términos generales, una MG es una red de distribución de energía eléctrica, generalmente en baja tensión (BT), que contiene recursos energéticos distribuidos (REDs) capaces de suplir la demanda local, sin tener que usar redes de transmisión; además suelen incluir sistemas de almacenamiento de energía, un sistema de control, comunicaciones y equipos de desconexión capaces de conectarla o desconectarla de otras redes de potencia (Palizban et al., 2014).

Las MGs son sistemas autónomos, confiables, autogestionados e independientes. Por su escalabilidad y versatilidad, son una opción factible tanto para zonas aisladas como para zonas urbanas. Además, debido a su alta capacidad para la penetración y gestión de energías renovables, se considera que las microrredes son una alternativa más verde a los sistemas tradicionales (Hirsch et al., 2018). Sin embargo, las microrredes cuentan con algunas desventajas frente a las redes de distribución convencionales, como lo son: altos costos, complejidad en la operación, necesidad de sistemas de control robustos, equipos de comunicación, almacenamiento y procesamiento de datos, problemas de calidad de la potencia, entre otros (Luna-Rubio et al., 2012; Parhizi et al., 2015).

Una de las desventajas de mayor que es objeto de este trabajo es la de altos costos, los cuales se relacionan con la compra e instalación de los equipos, la operación, el mantenimiento, los reemplazos y demás que se puedan dar durante la vida útil. Esta desventaja se aborda aplicando

técnicas de planeación y dimensionamiento, que tienen en cuenta la operación de los recursos, sus costos y las restricciones técnicas. El enfoque más conocido para abordar este problema se conoce como dimensionamiento óptimo.

2.1.1 Dimensionamiento óptimo.

Sin las técnicas adecuadas, las microrredes tienden a quedar sub-dimensionadas o con altos nivel de energía desperdiciada. Para superar este problema, se recurre a lo que se denomina dimensionamiento óptimo, el cual consiste en determinar la capacidad nominal óptima de los REDs de la microrred, de acuerdo con uno o más criterios de optimización y una serie de restricciones. Se formula como un problema de optimización donde las variables de diseño son la capacidad o cantidad de los REDs. Dentro de este problema se suelen incluir objetivos, reglas de despacho o restricciones que se relacionan con la operación futura y planeación del sistema. Los objetivos de la optimización del diseño de una microrred pueden ser criterios financieros, técnicos, sociales, ambientales o una combinación de estos (Lian et al., 2019; Luna-Rubio et al., 2012).

Este problema se plantea y resuelve usando softwares de modelado, simulación u optimización tales como GAMS, AMPL, Matlab, entre otros. Asimismo, existen softwares de simulación orientados a microrredes que permiten realizar esta tarea. Algunos ejemplos son HOMER Pro (Aberilla et al., 2020), HYBRID2 (Poudel et al., 2020), e iHOGA (Shamachurn, 2021). Sin embargo, no son adecuados para labores de investigación debido a sus capacidades limitadas intrínsecas y se recomiendan para uso comercial o educativo.

En la literatura se encuentra abundante material sobre el dimensionamiento óptimo (Luna-Rubio et al., 2012). Por ejemplo, algunos autores han centrado su atención en los algoritmos usados para mejorar la rapidez y exactitud de la solución, destacan algoritmos como PSO (Movahediyani & Askarzadeh, 2018), AG (Nagapurkar & Smith, 2019a), Búsqueda de Cuco (Bukar et al., 2019),

Optimización de Saltamontes (Bukar et al., 2019), entre otros. Otros autores han estudiado el impacto de considerar el comportamiento no determinístico de la carga (Chen et al., 2018) y la generación (Qiu et al., 2011), así como la inclusión de factores demográficos (Tito et al., 2016). Mientras un grupo importante de autores se han concentrado en la formulación del problema, incluyendo en el diseño criterios técnicos de confiabilidad (Luna-Rubio et al., 2012), reducción de emisiones de GEI (Nagapurkar & Smith, 2019b) o sistemas híbridos de hidrógeno (Seyyedeh-Barhagh et al., 2019) o calor (Zhang et al., 2015). La parte ambiental de las microrredes también ha sido abordada tanto en la operación (Ghasemi & Enayatzare, 2018) como desde el análisis de ciclo de vida (Nagapurkar & Smith, 2019b), la siguiente subsección amplía esto.

2.1.2. Impacto ambiental de las microrredes.

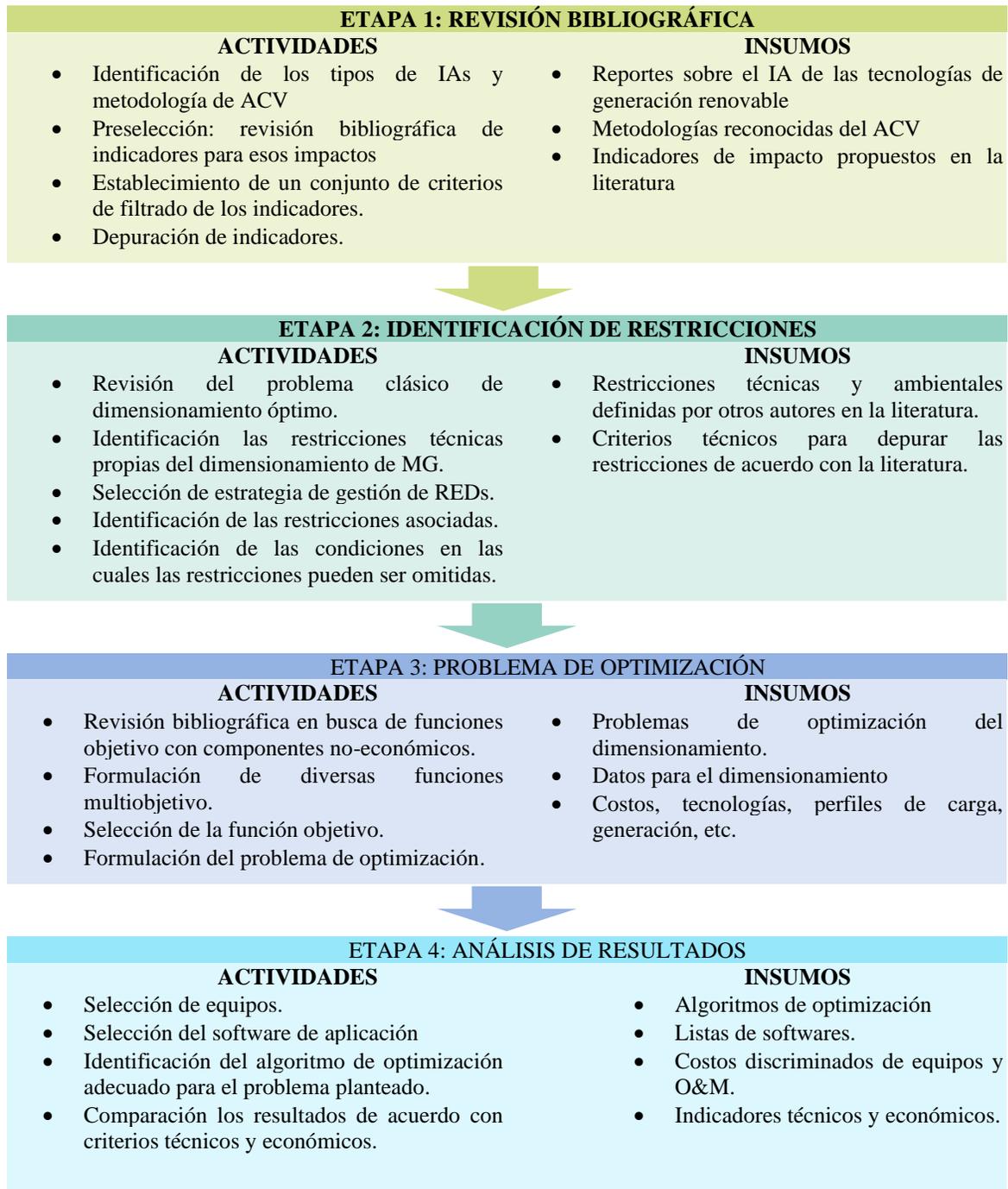
Si bien se encuentra abundante material sobre estudios del IA en el ciclo de vida de cada REDs, como por ejemplo los paneles fotovoltaicos (Hsu et al., 2012), las turbinas eólicas (Mendecka & Lombardi, 2019) o los sistemas de almacenamiento de energía de baterías (Sun et al., 2020); se encuentran pocos trabajos que incluya el ACV en sistemas de energía híbridos como la microrred. La revisión de la literatura muestra que el ACV en MGs se aplica para comparar soluciones puntuales (Smith et al., 2015), realizar análisis técnico-económicos tras la implementación y, en general, para estudiar el desempeño ambiental de estos sistemas.

No obstante, destacan dos casos de la consideración del ACV en el dimensionamiento. En primer lugar, un estudio (Zhang et al., 2015) consideró el ACV como parte del dimensionamiento de una MG con sistemas CHP para el aprovechamiento del calor; mientras que un segundo estudio consideró un función bi-objetivo económica y ambiental, sin embargo, el ACV se redujo al estudio de las emisiones de CO₂.

Como puede observarse, por un lado, este estudio es relevante, debido a la importancia del dimensionamiento de microrredes y los diversos esfuerzos para solucionar este problema. Por otro lado, este estudio es novedoso, pues se identifican esfuerzos incipientes en la inclusión del ACV en el dimensionamiento, sin embargo, en la mayoría se usa esta metodología como una herramienta de análisis de desempeño, mientras que ningún estudio ha considerado impactos ambientales debido a emisiones diferentes al CO₂.

2.2 Metodología

En esta sección se presentan las tareas, actividades, procedimientos y el método seguidos para la consecución del objetivo general. Esto con el fin de situar al lector en el enfoque usado y presentar los aspectos generales que permitan la reproductibilidad de los resultados. La metodología que se siguió en la ejecución comprendió cuatro etapas, asociadas directamente con los objetivos. La primera fase consta de la revisión bibliográfica, donde se recolectarán los IIA y la metodología del ACV que posteriormente se usarán. La segunda y tercera etapa están relacionadas, pues comprenden la fase de definición del problema de optimización, integrando los indicadores, las restricciones y la formulación de la función objetivo. Finalmente, se evaluaron los resultados de la estrategia de dimensionamiento propuesta. Este proceso se resume en la **¡Error!**
No se encuentra el origen de la referencia..

Figura 1.*Fases del desarrollo de la investigación.*

La primera fase del trabajo es la selección de indicadores de IA relacionados con una metodología de ACV. Se seleccionarán de acuerdo con su adaptabilidad al problema. Estos

indicadores deben ser de tipo cuantitativo, de tal manera que se puedan incluir en la función objetivo del dimensionamiento de la MG. Para esta etapa se consultaron las bases de datos del IEEE, Springer y Scimedirect, a través de la herramienta Scopus, para la revisión de artículos de revista y *reviews* relevantes sobre el tema. Así mismo se revisaron los algunos reportes sobre las metodologías de ACV llamadas ReCiPe, CML2000 y Ecoindicador99. De estas se seleccionó la metodología ReCiPe para la integración del estudio.

Los problemas de optimización del dimensionamiento en sistemas eléctricos están sujetos a restricciones, expresadas en ecuaciones, inecuaciones o sentencias condicionales, que permiten darle sentido físico al problema. En la segunda etapa la meta es identificar estas restricciones. En ese sentido, se identificaron las restricciones técnicas asociadas con las capacidades de generación, la capacidad de la batería, entre otros; además se definió un enfoque de gestión y despacho de potencia basado en reglas. Para completar el problema de optimización se planteó la función objetivo, donde se integraron los indicadores de IA a la función objetivo, de tal manera que, al resolver el problema, el IA global de las fuentes de energía sea minimizado y el costo del sistema no se vea afectado drásticamente.

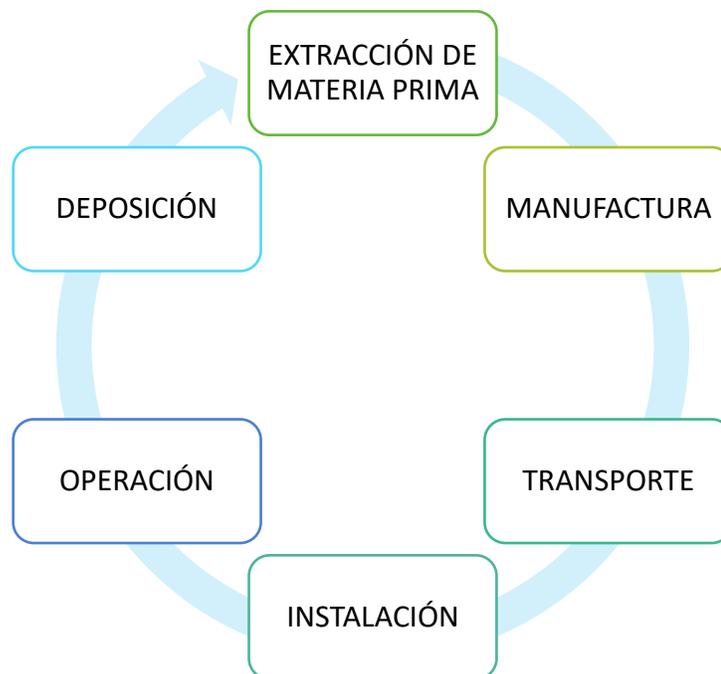
La última fase comprende el análisis de resultados producto de la simulación. En este punto se resolvió el problema de optimización usando Matlab. Para esto, se usó un algoritmo de búsqueda exhaustiva que se ajustaba a la naturaleza no lineal y no convexa del problema, además permitió llevar registro de todas las soluciones y la velocidad de convergencia fue alta. Para la resolución de esta última frase fue necesario tener información de costos, perfiles de carga, información de recursos energéticos y seleccionar un tipo de panel, turbina eólica, generador diesel y tipo de batería para la microrred.

3. Análisis de ciclo de vida e indicadores de impacto ambiental

El ACV es una técnica para evaluar los impactos ambientales asociados con la cadena de suministro de un producto, esto es, desde la extracción de materia prima hasta su disposición final, pasando por el procesado de materiales, fabricación, distribución, uso, reparación, mantenimiento y reciclaje (Caro, 2019). La Figura 2 presenta las fases básicas del ACV.

Figura 2.

Ciclo de vida de un producto y sus etapas.



Una evaluación adecuada del ciclo de vida ayuda a evitar una perspectiva limitada sobre las preocupaciones ambientales, mientras que se tiene una visión holística del impacto de un producto o servicio (Xie et al., 2017). Esta técnica sirve como herramienta de comparación, por lo que ayuda a decidir el curso de acción entre diversas opciones (Curran, 2018), pero está orientada a analizar el desempeño de los productos o servicios. Sin embargo, en este trabajo, el ACV se usa como una herramienta para su dimensionamiento y planeación, es decir, antes de su construcción.

Así, en este trabajo de investigación no se realiza propiamente un análisis de ciclo de vida, sino que se toman y adaptan algunas de sus características para resolver un problema nuevo.

En todo caso, la columna vertebral de este trabajo de investigación es la formulación de la función objetivo que permita analizar el problema de dimensionamiento desde una perspectiva del ACV. En este capítulo se presenta la metodología en la cual se inspiró dicha función, así como los indicadores de impacto ambiental asociados a ella. Al final se presenta cómo todo esto se tuvo en cuenta para establecer la función se incluyó en el problema de optimización.

3.1 Metodología de ACV: ReCiPe v1.1

Esta sección presenta la metodología en la cual se inspiró la función objetivo incluida en el dimensionamiento. Aquí se describen sus características más importantes y relevantes para el trabajo, así como las partes que se aplicaron, el área de protección abordada, las limitaciones y aquello que se omitió.

En primer lugar, es preciso señalar que la metodología ReCiPe (National Institute for Public Health and the Environment, 2017) es un esfuerzo por armonizar y estandarizar el ACV, así como proveer de herramientas, datos, relaciones y categorías que permitan la cuantificación del impacto ambiental de un producto o servicio, todo a través de una serie de factores que relacionan las cantidades de material contaminante emitido con impactos ambientales de punto medio (*midpoint level*) y punto final (*endpoint level*). Este método fue desarrollado inicialmente en 2008 por el RIVM^{§§}, la universidad Radbound de Nimega, la Universidad de Leiden y algunos consultores; y fue actualizado en el año 2016 a la versión 1.1.

La idea principal tras el método de ReCiPe es transformar las emisiones de determinadas sustancias (estresores) en un número limitado de indicadores de impacto ambiental, a través de

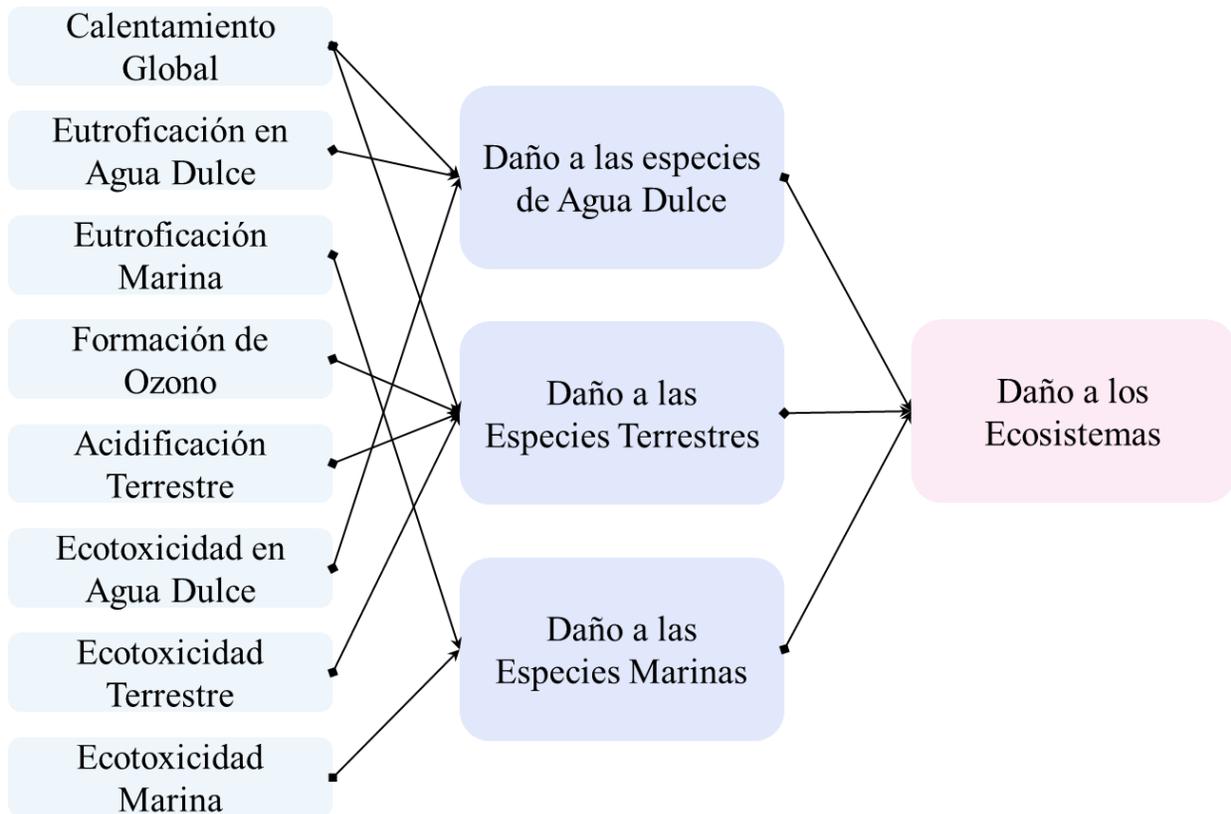
^{§§} Siglas en neerlandés para Instituto Nacional para la Salud Pública y el Medio Ambiente.

una serie de factores de caracterización. Los factores de caracterización indican el impacto ambiental por unidad del estresor. Estos factores son de punto medio cuando están asociados directamente con las emisiones de un estresor, mientras que son factores de caracterización de punto final cuando se asocian con alguna de las tres áreas de protección, a saber, salud humana, calidad de los ecosistemas y escasez de recursos.

Determinados estresores se asocian con una o más áreas de protección. Por ejemplo, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provocan afectaciones en las dos áreas de protección. La cadena de impacto, según ReCiPe v1.1, es la siguiente: el incremento de la concentración de GEI contribuye al efecto invernadero, que eleva la temperatura de la tierra. Esta elevación de temperatura provoca cambios la distribución de enfermedades e inundaciones (que dañan la salud humana), además conlleva cambios en la distribución de los biomas y las descargas de los ríos (afectando los ecosistemas). La Figura 3 presenta la relación entre las categorías de impacto de punto medio y las áreas de protección.

Figura 3

Revisión de las categorías de impacto y su relación con las áreas de protección cubiertas por el ReCiPe. Tomado de (National Institute for Public Health and the Environment, 2017).



Esta metodología incluye información muy valiosa para los interesados en el ACV, sin embargo, para este trabajo de investigación, se recogerá de ella las relaciones cuantitativas que establece entre estresores y áreas de protección. Pues, a partir de información de la cantidad emitida de una sustancia es posible cuantificar el impacto que tienen este estresor en un área. En la sección 3.3 se explica por qué esto es tan relevante.

3.2 Indicadores de impacto ambiental

Como se apreció en la sección anterior, la metodología presenta una serie de factores de punto medio que relacionan un conjunto de categorías de impacto ambiental con diversas áreas de protección. En esta sección se detalla cada uno de estos indicadores y la contribución de cada una

de las tecnologías de la microrred en estas categorías. En primer lugar, es necesario precisar que el enfoque de este trabajo se orienta a cuantificar el impacto ambiental sobre el área de protección relacionada con los ecosistemas, debido a que la protección de los ecosistemas ante las actividades humanas es la principal motivación de este trabajo de investigación.

De acuerdo con la Figura 3, al área de protección denominada *damage to ecosystems* se le asocian tres caminos de impacto, que son *damage to freshwater species*, *damage to terrestrial species* y *damage to marine species*. Este modelo propone cuantificar el impacto a esos tres grupos de especies a través de la cuantificación de las emisiones de estresores asociados con el calentamiento global, el uso del agua, la ecotoxicidad, la eutroficación, la formación de ozono, la acidificación, y el uso y transformación de la tierra. Asimismo, cada uno de estos impactos tiene asociado una unidad de medida dada la cantidad emitida del estresor. La Tabla 1 relaciona las categorías de punto medio con sus unidades de medida.

Tabla 1

Categorías de impacto ambiental asociadas al área de protección de ecosistemas y sus unidades de medida estándar según ReCiPe.

CATEGORÍA	UNIDAD DE MEDIDA	CATEGORÍA	UNIDAD DE MEDIDA
Calentamiento global	kg CO ₂ e	Ecotoxicidad	kg 1,4-DCBe
Eutroficación	kg Pe	Uso de la tierra	m ² de terreno usado
Formación de O₃	kg NO _x e	Uso del agua	m ³ de agua consumida
Acidificación	kg SO ₂ e		

Nota. CO₂ se refiere a dióxido de carbono, O₃ a ozono, P a fósforo, NO_x a la familia de óxidos de nitrógeno, SO₂ a dióxido de azufre y DCB a diclorobenceno.

En el caso de este trabajo de investigación, las categorías usadas para la cuantificación del impacto ambiental dependen del tipo de componente de la microrred, por lo que no todos impactan en todas las categorías. Adicionalmente, no se cuentan con estudios armonizados que recojan el

impacto ambiental de cada tecnología en todas las categorías, de hecho, la disponibilidad de información generalizable es uno de los principales inconvenientes a la hora de tratar con análisis de impacto ambiental.

En cualquier caso, para esta investigación no se consideraron las categorías “uso de la tierra” ni “uso del agua” por la falta de información disponible, por lo que los indicadores de impacto ambiental seleccionados derivan de las categorías cambio climático, eutroficación, formación de O₃, acidificación y ecotoxicidad. Seguido a esto, se indagó sobre estudios de ACV en cada una de las 4 tecnologías que componen los REDs de la microrred, para así tener una estimación de las emisiones de cada estresor por cada kWh generado por cada tecnología, y así establecer una relación entre la producción energética y las emisiones.

3.2.1 Impacto ambiental de los sistemas fotovoltaicos

Para los sistemas fotovoltaicos (y para los demás REDs) el impacto ambiental en el ciclo de vida se obtuvo de la revisión de la literatura. Se seleccionaron artículos que reportaran la cantidad de emisiones de los estresores por kWh. En el caso puntal de los sistemas fotovoltaicos se usó lo reportado por (Vega & Zaror, 2018) para sistemas fotovoltaicos policristalinos ubicados en el desierto de Atacama de Chile. A través de un proceso de armonización y siguiendo la metodología de ACV CML 2000 los autores estimaron el impacto ambiental de generar 1 kWh de energía fotovoltaica. La Tabla 2 recoge los datos reportados para las 5 categorías de interés.

Tabla 2

Indicadores de impacto ambiental de la generación de 1 kWh de energía fotovoltaica según Vega y Zaror (2018).

CATEGORÍA	INDICADOR	VALOR
Calentamiento Global	GWP	1×10^{-1} kg CO ₂ e
Eutroficación	EP	1×10^{-4} kg PO ₄ ⁻³ e

Formación de O₃	POF	1×10^{-5} kg C ₂ H ₄ e
Acidificación	AP	4×10^{-4} kg SO ₂ e
Ecotoxicidad	FAET	2×10^{-2} kg 1,4-DBe
	TET	2×10^{-14} kg 1,4-DBe

Nota. Las categorías mencionadas en la sección 2 tienen asociados unos indicadores de impacto ambiental para su medición, esto son: GWP (Global Warming Potential), EP (Eutrophication Potential) POF (Photochemical Ozone Formation), AP (Acidification Potential), FAET (Freshwater Aquatic Ecotoxicity), MAET (Marine Aquatic Ecotoxicity) y TET (Terrestrial Ecotoxicity). Adicionalmente, la metodología CML 2000 maneja algunas unidades base diferentes, en la sección 3.3 se presenta la conversión entre CML 2000 y ReCiPe.

3.2.2 Impacto ambiental de las turbinas eólicas

Los valores para los indicadores para las turbinas eólicas fueron tomados de diferentes fuentes, ya que no se identificó un trabajo que reporte información sobre todos los indicadores importantes. Para los indicadores de GWP, EP y AP se usó lo reportado por Mendecka & Lombardi (2019), quienes se dieron a la tarea de ajustar una curva que relacionara la capacidad nominal de las turbinas eólicas con los impactos en las tres categorías así:

$$GWP_{wt} = 2615,6(CN_{wt})^{0,7462} \quad \text{kg CO}_2\text{e} \quad (2)$$

$$EP_{wt} = 2,562(CN_{wt})^{0,7418} \quad \text{kg PO}_4\text{e} \quad (3)$$

$$AP_{wt} = 16,472(CN_{wt})^{0,7385} \quad \text{kg SO}_2\text{e} \quad (4)$$

Donde el subíndice *wt* representa las turbinas eólicas y CN_{wt} representa la capacidad nominal del generador eólico en kW. Seguidamente, para POF y ecotoxicidad se tomó lo reportado por Arvesen (2012) para pequeñas turbinas eólicas, quien reporta $1,72 \times 10^{-4}$ kg NO_xe de POF, $1,60 \times 10^{-4}$ kg 1,4 – DBe para TET y 0,01 kg 1,4 – DBe para FAET.

3.2.3 Impacto ambiental de los sistemas de baterías de litio

En el caso de las baterías, se asumió que su tipo eran baterías de ion de litio tipo NCM (*nickel cobalt manganese oxide*), pues son populares en los sistemas de potencia de respaldo y generación de energía estáticos (Stan et al., 2014). Se recurrió al ACV realizado por (Sun et al., 2020), quienes siguieron la metodología ReCiPe en su estudio del ACV. Los datos reportados por kWh de capacidad de las baterías NCM se recogen en la Tabla 3.

Tabla 3

Impacto ambiental por cada kWh de capacidad de baterías de litio tipo NCM, según Sun et al. (2020).

CATEGORÍA	INDICADOR	VALOR
Calentamiento Global	GWP	93,57 kg CO ₂ e
Eutroficación	F-EP	0,01 kg Pe
	M-EP	0,02 kg Ne
Formación de O ₃	POF	0,29 kg NMVOCe
Acidificación	AP	0.49 kg SO ₂ e
Ecotoxicidad	FAET	1,5 kg 1,4-DBe
	MAET	No reporta
	TET	0,01 kg 1,4-DBe

3.2.4 Impacto ambiental de la generación diesel

El impacto ambiental de la generación diesel se concentra casi un 95% en las emisiones derivadas de su operación (Benton et al., 2017). En este caso, solo se recogen los reportes de emisiones por litro de combustible diesel consumido y el impacto de su quema. Para ello, se recurrió al trabajo de (Sothea & Kim Oanh, 2019) para obtener información sobre GWP, mientras que se recurrió a la página web del gobierno de Canadá para información referente a AP y POF.

Sobre EP y ecotoxicidad no se identificó información. La Tabla 4 recoge la información para las emisiones del generador diesel.

Tabla 4

Impacto ambiental por litro de diesel consumido, según Sothea & Kim Oanh (2019) y el Gobierno de Canadá.

CATEGORÍA	INDICADOR	VALOR
Calentamiento Global	GWP	2,81 kg CO ₂ e
Formación de O ₃	POF	7,24×10 ⁻² kg NMVOCe
Acidificación	AP	4.8×10 ⁻³ kg SO ₂ e

3.3 Función objetivo

Una vez conocido el impacto ambiental en el ciclo de vida de cada uno de los REDs que componen la MG, en esta sección se procede a formular la función objetivo que hace parte de la formulación del dimensionamiento. En primer lugar, es preciso relacionar los impactos ambientales con la capacidad nominal de los RED o su producción energética, para que puedan ser incluidos correctamente en la formulación. Así mismo, la función objetivo formulada ambiental debe incluir las 5 categorías en los mismos términos dimensionales (iguales unidades).

En el caso de la relación entre impactos y capacidad nominal se escogió hacerlo a través de la producción energética, esto es, el impacto ambiental se cuantifica por kWh de la generación de los REDs, excepto para el diesel, donde se cuantificó por litro. Se escogió este enfoque porque es como se reporta el IA de los REDs en los artículos presentados en la sección anterior, además de que es más cómodo para la implementación del problema de dimensionamiento, comparado con relacionar los IAs directamente con la capacidad nominal de los sistemas (ver Capítulo 4).

En cuanto al análisis dimensional de la función objetivo, ReCiPe permite transformar los indicadores de punto medio en punto final a través de algunos factores. Esto permite llevar todos

los indicadores de un área de protección a las mismas unidades y ponderar sus efectos. Por ejemplo, para el área de protección de daño a los ecosistemas todos los indicadores de punto medio se pueden transformar al indicador Pérdidas de Especies Integrado en el Tiempo (*time-integrated species loss*) que se mide en *especies-año*. Esto se hace multiplicando el impacto ambiental por un factor de transformación de punto medio a punto final, donde cada categoría tiene su propio factor de transformación. Esta transformación se puede expresar así:

$$CF_{e_{x,c,a}} = CF_{m_{x,c}} \cdot F_{M \rightarrow E_{c,a}} \quad (5)$$

Donde CF_e representa el factor de caracterización de punto final del impacto, CF_m el factor de caracterización del impacto de punto medio y $F_{M \rightarrow E}$ representa el factor de transformación. Los subíndices x , c y a denotan el estresor de interés, la perspectiva cultural y el área de protección, respectivamente. El valor del factor de transformación para cada categoría se recoge en la Tabla 5.

Tabla 5

Valores de los factores de transformación de punto medio a punto final. Tomado de (National Institute for Public Health and the Environment, 2017).

INDICADOR	VALOR	UNIDADES
GWP	2,8E-9	especies-año/kg CO ₂ e
POF	1,3E-7	especies-año/kg NO _x
AP	2,1E-7	especies-año//kg SO ₂
F-EP	6,1E-7	especies-año/kg P
M-EP	1,7E-9	especies-año/kg N
TET	5,4E-8	
FAET	7,0E-10	especies-año/1,4DCB
MAET	1,1E-10	

Un aspecto importante de las metodologías de ACV es que la cuantificación del impacto depende de una perspectiva cultural, i. e. un número limitado de perspectivas que tienen el objetivo de agrupar elecciones necesarias para la construcción de los modelos. ReCiPe maneja 3 perspectivas culturales: individualista, jerárquica e igualitaria. La perspectiva afecta el valor de factor de transformación, por lo que es imprescindible elegir una. Para este trabajo, se tomó la perspectiva jerárquica, debido al horizonte de tiempo sobre el que opera el impacto ambiental (100 años) es acorde con la vida útil de las MGs y es la perspectiva basada en el consenso científico.

A partir de la información de impacto ambiental consignada en las tablas 2 a 4 y las ecuaciones 2 a 4 se formula la función objetivo siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Se expresan todos los impactos ambientales en las unidades propuestas por ReCiPe para cada categoría.
2. Se expresan estos impactos ambientales por kWh o L, según sea el caso.
3. Se multiplica cada impacto ambiental por la variable de diseño del problema, es decir, por la potencia generada (para WT, FV y BESS) y consumo de diesel (para GD).
4. Se multiplica el término resultante por el factor de transformación correspondiente.
5. Se suman todos los términos.

Al final se obtiene una función objetivo lineal que permite cuantificar el impacto ambiental sobre el área de protección de daño a los ecosistemas, según la perspectiva jerárquica, en función de la potencia generada por los REDs y el consumo de diesel. A continuación, se realiza la aplicación del procedimiento anterior a cada uno de los REDs.

3.3.1 Función objetivo: sistema fotovoltaico

A partir de los datos consignados en la Tabla 2 y en la Tabla 5 es posible establecer la parte de la función objetivo que corresponde al impacto de la producción de 1 kWh de energía con los sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, los valores de la Tabla 2 para Eutroficación y Formación de

O₃ deben ser transformados a las unidades de ReCiPe, ya que están dados en unidades de la metodología CML 2000. Es posible hacer esta transformación gracias al trabajo de Owsianiak *et al.* (2013), así:

$$1 \text{ [kg P - eq]} = \frac{1}{3,03} \text{ [kg PO}_4^{-3} \text{ - eq]} \quad (6)$$

$$1 \text{ [kg NO}_x \text{ - eq]} = 0,4814 \text{ [kg C}_2\text{H}_4 \text{ - eq]} \quad (7)$$

Nótese que toda la eutroficación reportada en Vega y Zaror (2018) se asumió en el indicador F-EP (*freshwater eutrophication*) por simplicidad, ya que no se tiene información de qué proporción de la sustancia se emite en el agua marina. Al convertir los datos correspondientes de la Tabla 2 y multiplicándolos por los factores de transformación de la Tabla 5 se puede obtener el coeficiente de impacto de la generación fotovoltaica, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6

Valores para el cálculo del coeficiente de la función impacto ambiental para los sistemas fotovoltaicos.

INDICADOR	VALOR	$F_{M \rightarrow E}$	Coefficiente
GWP	1E-1	2,8E-9	2,8E-10
F-EP	3,3E-5	6,1E-7	2,0E-11
POF	4,8E-6	1,3E-7	6,2E-13
AP	4E-4	2,1E-7	8,4E-11
FAET	2E-2	7,0E-10	1,4E-11
TET	2E-14	5,4E-8	1,1E-21
COEFICIENTE SUMA			3,99E-10

Por lo tanto, el coeficiente de impacto de la generación de 1kWh de energía con un sistema fotovoltaico es de 3,99 especies-año. Así, la función lineal de impacto ambiental del sistema fotovoltaico es

$$IA_{PV} = 3,99 \times 10^{-10} \cdot E_{PV} \quad (8)$$

Donde IA_{PV} representa el impacto ambiental de la generación de energía eléctrica en especies – año y E_{PV} representa la energía generada por un sistema fotovoltaico en kWh.

3.3.2 Función objetivo: turbinas eólicas

El caso de las turbinas eólicas es especial, puesto que para los indicadores de GWP, EP y AP el impacto está presentado en términos de su capacidad nominal. Sin embargo, para mantener consistencia con la formulación del problema de dimensionamiento y su función objetivo, se transformó este impacto a valores en términos de la energía producida. Para ello, se dividió el impacto total entre la energía generada en la vida útil así

$$GWP_{wt}^* = \frac{GWP_{wt}}{vu_{WT} \cdot GA_{WT}} \quad (9)$$

$$EP_{wt}^* = \frac{EP_{wt}}{vu_{WT} \cdot GA_{WT}} \quad (10)$$

$$AP_{wt}^* = \frac{AP_{wt}}{vu_{WT} \cdot GA_{WT}} \quad (11)$$

Donde GWP_{wt}^* es el GWP en kg CO₂e/kWh, EP_{wt}^* es el EP en kg PO₄⁻³e/kWh, AP_{wt}^* es el AP en kg SO₂e/kWh, vu_{wt} es la vida útil de las turbinas y GA_{wt} es la generación anual de las turbinas. Esta transformación depende de las especificaciones técnicas de la turbina, por lo que se preseleccionó para la MG una turbina de 10 kW de la marca Aeolos, cuyas especificaciones particulares se presentan en el siguiente capítulo. Dada esta turbina, la energía generada en su vida útil (GT_{WT}) dado el perfil de viento de la ubicación desea es

$$GT_{WT} = vu_{WT} \cdot GA_{WT} = 20 \text{ años} \cdot 2,43 \times 10^4 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \quad (12)$$

$$GT_{WT} = 486 \times 10^3 \text{ kWh} \quad (13)$$

Así, para una turbina Aeolos de 10 kW en la ubicación de la MG, el impacto ambiental estimado por kWh en todas las categorías de estudio se reporta en la Tabla 7.

Tabla 7

Valores para el cálculo del coeficiente de la función impacto ambiental para la generación eólica.

INDICADOR	VALOR	$F_{M \rightarrow E}$	Coefficiente
GWP	3,0E-2	2,8E-9	8,4E-11
F-EP	9,6E-6	6,1E-7	5,9E-12
POF	1,7E-4	1,3E-7	2,2E-11
AP	1,9E-4	2,1E-7	4,0E-11
TET	1,6E-4	5,4E-8	8,6E-12
FAET	1,0E-2	7,0E-10	7,0E-12
COEFICIENTE SUMA			1,67E-10

Así, el impacto ambiental en el área de protección de daño a los ecosistemas producido por generar 1 kWh de generación eólica en la microrred se estimaría como sigue

$$IA_{WT} = 1,67 \times 10^{-10} E_{WT} \quad (14)$$

3.3.3 Función objetivo: sistema de baterías

En el caso de las baterías, los datos reportados en la Tabla 3 se refieren al impacto por kWh de capacidad, mientras que en este trabajo interesa el impacto por kWh generado. Así, se usó la misma lógica que en la sección anterior y se transformó el impacto a través del uso del *energy throughput* de la batería seleccionada. Este parámetro es una forma en que los fabricantes

cuantifican la vida útil de una batería en términos de la energía neta que circula por ella. La conversión se hace a través de la siguiente expresión

$$IA_{bs}^* = IA_{bs} \cdot \frac{CN_{bs}}{ETP_{bs}} \quad (15)$$

Donde IA_{bs}^* indica el impacto ambiental por kWh generado, IA_{bs} el impacto ambiental por kWh de capacidad, CN_{bs} la capacidad nominal de la batería y ETP_{bs} el *energy throughput* de la batería. La unidad de batería seleccionada es de 9,8 kWh y su ETP es de 30 MWh. Aplicando esta transformación a los datos de la Tabla 3 se obtienen el impacto ambiental actualizado. Seguidamente, multiplicando el resultado por el factor de transformación se puede obtener el coeficiente de impacto de la energía que circula (carga y descarga) por la batería. Estos valores se registran en la Tabla 8.

Tabla 8

Valores para el cálculo del coeficiente de la función impacto ambiental para el sistema de baterías.

INDICADOR	VALOR	$F_{M \rightarrow E}$	PRODUCTO
GWP	3,1E-2	2,8E-9	8,7E-11
F-EP	3,3E-6	6,1E-7	2,0E-12
M-EP	6,5E-6	1,7E-9	1,1E-14
POF	2,7E-5	1,3E-7	3,5E-12
AP	1,6E-4	2,1E-7	3,4E-11
FAET	4,9E-4	7,0E-10	3,4E-13
TET	3,3E-6	5,4E-8	1,8E-13
COEFICIENTE			1,3E-10

Por lo tanto, la expresión lineal para cuantificar el impacto ambiental de la batería en términos de la energía que fluye por esta se expresa como así

$$IA_{WT} = 1,3 \times 10^{-10} |E_{BS}| \quad (16)$$

3.3.4 Función objetivo: generación diesel

La generación diesel es particular porque el impacto viene dado por litro de combustible. Los valores de la Tabla 4 se recogen en la Tabla 9 junto con el factor de transformación y el producto. La única modificación respecto a los valores de la Tabla 4 es que el POF viene dado en kg NMVOCe, pero ReCiPe sugiere kg NO_xe. El factor de transformación de estas unidades es de 0,29 de acuerdo con la metodología ReCiPe.

Tabla 9

Valores para el cálculo del coeficiente de la función impacto ambiental para la generación diesel.

INDICADOR	VALOR	$F_{M \rightarrow E}$	PRODUCTO
GWP	2,81	2,8E-9	7,9E-9
POF	7,2E-2	1,3E-7	9,4E-9
AP	4,8E-3	2,1E-7	1,0E-9
	COEFICIENTE		1,83E-8

Así, la expresión lineal para cuantificar el impacto de las emisiones producto de la quema del diesel en función del consumo del diesel (f_{DG}) es

$$IA_{DG} = 1,83 \times 10^{-8} f_{DG} \quad (17)$$

3.3.5 Expresión final

La función objetivo se construye a partir de la suma de las 4 funciones determinadas anteriormente. Así, el impacto ambiental de la microrred, cuantificado a partir de la producción energética de cada uno de los REDs que la componen se estima así:

$$IA_{MG} = 3,98 \times 10^{-10} E_{PV} + 1,67 \times 10^{-10} E_{WT} + 1,25 \times 10^{-10} |E_{BS}| + 1,83 \times 10^{-8} f_{DG} \quad (18)$$

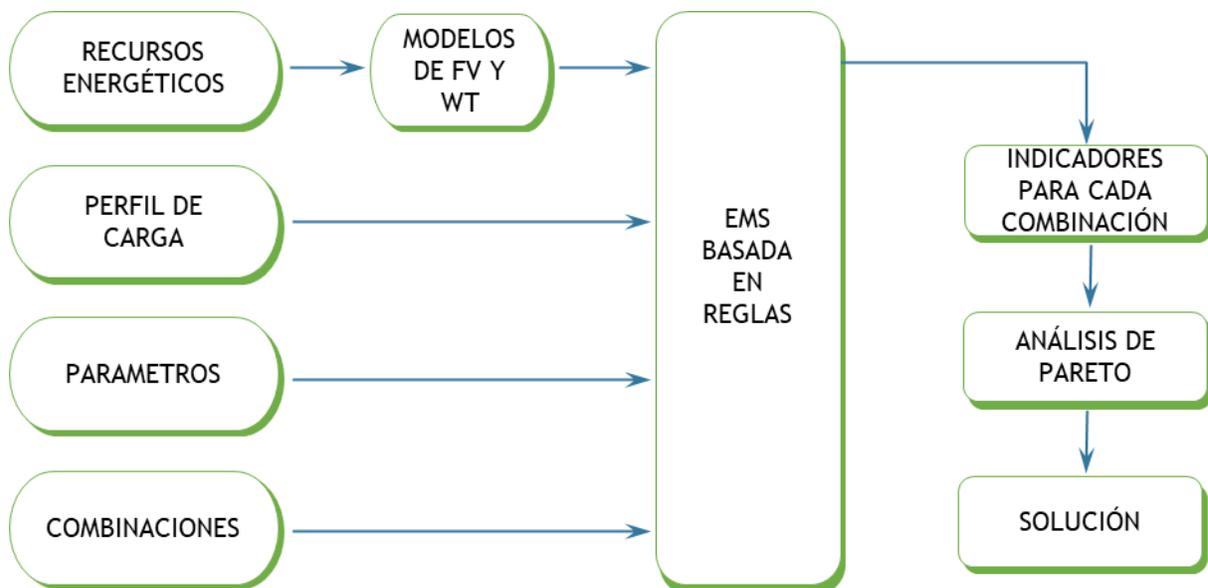
Se observa que la variable con más peso es el consumo de combustible, tal y como se esperaba, con un impacto superior en dos órdenes de magnitud a los demás componentes de la

MG. El capítulo siguiente describe la formulación del dimensionamiento implementado, donde se explica por qué la función objetivo de impacto ambiental conviene formularla en términos de energía producida y se sirven los detalles del paso a paso del dimensionamiento de una microrred.

4. Formulación del dimensionamiento considerando ACV

Este capítulo presenta la formulación completa del dimensionamiento de una MG compuesta por un sistema FV, turbinas eólicas, baterías y un generador diesel teniendo como objetivo reducir el impacto ambiental sin perjudicar el costo. El enfoque de la formulación corresponde a una estrategia de despacho basada en reglas. La estrategia de solución del problema se describe en la Figura 4.

Figura 4.
Esquema que resume el proceso de dimensionamiento.



El procedimiento de la anterior figura corresponde a un proceso unidireccional, donde, a partir de la información de las variables meteorológicas asociadas a los Recursos Energéticos, los Modelos de la Generación FV y eólica, el Perfil de Carga y los Parámetros económicos, técnicos y ambientales; se calcula el desempeño de cada una de las combinaciones de componentes de la microrred posibles, dentro de la *energy management strategy* basada en reglas para los 5 años.

Para cada combinación se obtienen indicadores económicos, de confiabilidad y ambientales que permiten analizar su desempeño usando la técnica del Frente de Pareto. El algoritmo usado para obtener las soluciones es un algoritmo de búsqueda exhaustiva.

A continuación, se detalla la estrategia de dimensionamiento. En primer lugar, se presenta la función objetivo, luego las restricciones, la estructura de la estrategia de despacho y gestión de potencia, los modelos matemáticos en los cuales se basa la formulación y, finalmente, la estrategia de análisis de resultados.

4.1 Función multiobjetivo

Los objetivos del dimensionamiento son la minimización conjunta del costo de la microrred y el impacto ambiental en los ecosistemas, que se calculan para cada combinación al final del bucle de la EMS, pues es necesario conocer la operación del sistema para saber sus costos y emisiones. Se ahondará en la función económica, pues la función ambiental se definió en el capítulo anterior. La función objetivo económica se basa en la métrica del costo presente neto (NP, por sus siglas en inglés), que es una medida del costo de un proyecto si todas las inversiones futuras se hicieran el día presente, teniéndose en cuenta la inflación y las tasas de descuento futuras del proyecto. Es una forma de traer flujos de carga futuros al valor de la moneda presente. Matemáticamente, se puede expresar de la siguiente manera:

$$NPC = I_0 + \sum_{y=1}^Y \frac{F_y}{(1+i)^y} \quad (19)$$

Donde NPC representa el costo presente neto, I_0 representa los costos de la inversión inicial en el año 0, F_y representa los flujos de dinero en el año y , i la tasa de descuento anual y Y el total de años de duración del proyecto o periodo de análisis. El término I_0 se asocia a las compras

iniciales de los equipos y su instalación, mientras que el término F_y depende del funcionamiento anual de la microrred, es decir, recoge los costos de operación, mantenimiento y combustible que se dan en cada año. Este proyecto se asumió para un espacio de análisis de operación de 5 años, y la tasa de descuento se calcula así:

$$i = \frac{i_n - i_f}{1 + i_f} \quad (20)$$

Donde i_n es la tasa de descuento nominal, que se asumió del 9% para Colombia y i_f la tasa de inflación promedio de los próximos 5 años que se asumió en 2,25 %. El capital inicial representado en I_0 se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_0 = p_{fv}C_{fv} + p_{wt}C_{wt} + p_{gd}C_{gd} + p_{bs}C_{bs} \quad (21)$$

Donde p_{fv} , p_{wt} , p_{gd} y p_{bs} representa el precio de compra e instalación de un panel fotovoltaico, una turbina eólica, un generador diesel y una batería, respectivamente, expresados en \$/unidad; mientras que C_{fv} , C_{wt} , C_{gd} y C_{bs} representa la cantidad de paneles, turbinas, generadores y baterías, respectivamente. Mientras que el F_y es la acumulación de costos en los que se incurre durante un año de operación, es decir, el costo de combustible (C_{FCy}), los costos de operación y mantenimiento (C_{OMy}) y los costos de reemplazos (C_{REy}), así:

$$F_y = C_{FCy} + C_{OMy} + C_{REy} \quad (22)$$

$$C_{OMy} = OM_{fv}C_{fv} + OM_{wt}C_{wt} + OM_{bs}C_{bs} + OM_{gd}OH_{gd}C_{gd} \quad (23)$$

$$C_{FCy} = p_d F C_{gd} \quad (24)$$

$$C_{REy} = 0,8 \left(p_{fv} C_{fvRy} + p_{wt} C_{wtRy} + p_{gd} C_{gdRy} + p_{bs} C_{bsRy} \right) \quad (25)$$

OM_{fv} , OM_{wt} , OM_{bs} y OM_{gd} es el precio de operación y mantenimiento de los elementos en \$/unidad y \$/h (para el generador diesel), y OH_{gd} el número de horas de operación del generador. p_d representa el precio del diesel, FC_{gd} el combustible consumido en el año y . Finalmente, C_{fvR} , C_{wtRy} , C_{gdRy} y C_{bsRy} son las cantidades reemplazadas de paneles, turbinas, generadores o baterías en el año y , respectivamente.

Finalmente, se debe tener en cuenta el costo de salvamento al final de los 5 años. El salvamento es la cantidad de dinero que se espera obtener al final de la vida útil de un proyecto, es decir, son todos aquellos ingresos debidos a la reventa de los componentes que aún funcionan. En el caso de este problema de optimización, se aprovecha este principio para modificar los costos de compra de los equipos. El salvamento (C_{sa}) se puede calcular a partir del tiempo de uso (t_{uso}), la vida útil del equipo (t_{vu}) y el costo de compra e instalación del equipo (C_{ci}) así:

$$C_{sa} = - \left(1 - \frac{t_{uso}}{t_{vu}} \right) C_{ci} \quad (26)$$

Este ingreso solo se aplica al final de los 5 años, por lo que en la ecuación del NPC solo aparece cuando $y = 5$ restándose dentro de F_5 . Asimismo, aplica para todos los equipos, y debe tenerse en cuenta que la vida útil del panel y la turbina eólica es fija en 25 y 20 años, respectivamente; mientras que la vida útil del generador diesel depende de las horas de operación y de la batería depende del *energy throughput*.

4.2 Restricciones

Las restricciones limitan los valores que las variables de diseño pueden tomar, por ejemplo: la cantidad de paneles debe ser mayor a cero o el SOC máximo de una batería es 100%. Por lo tanto, las restricciones permiten darle sentido físico al problema y que los resultados sean precisos y realistas. Para este problema se consideran 5 tipos de restricciones.

4.2.1 Balance de potencia

El balance de potencia es la restricción más importante, pues es donde se garantiza que la generación atienda la carga. Para ello, se iguala la generación con la carga. La ecuación siguiente presenta esta restricción:

$$P_{gd}(t) + P_{bs}(t) = P_c(t) - (P_{wt}(t) + P_{fv}(t)) \quad (27)$$

Donde P_{gd} representa la potencia generada por el generador diesel, P_{bs} la potencia entregada (positiva) o absorbida (negativa) por la batería, P_c representa la demanda, P_{wt} la potencia generada por la turbina eólica y P_{fv} la potencia generada por los paneles fotovoltaicos. Obsérvese que al lado izquierdo de la ecuación se encuentran las fuentes despachables (generación diesel y baterías) y al lado izquierdo la carga menos las fuentes renovables, pues esta diferencia entre carga y renovables es conocida. En cambio, los efectos del sistemas de distribución se despreciaron y el reparto de potencia entre las fuentes despachables se dará de acuerdo con lo explicado en la siguiente sección.

Adicionalmente, esta restricción se complementa con el componente de confiabilidad. En este caso particular, la confiabilidad se refiere a la capacidad del sistema para mantener el suministro de potencia a la carga. Esto se puede medir a través de diversos indicadores, pero el

más popular aplicado al dimensionamiento es el Loss of Power Supply Probability (LPSP), que se define como el porcentaje de potencia, respecto a la demanda, que no es posible satisfacer. El límite máximo para el valor promedio del LPSP se fijó en el 5%. El LPSP se puede definir así:

$$LPSP(t) = 100 \cdot \left(\frac{P_c(t) - P_{dg}(t) - P_{bs}(t) - P_{wt}(t) - P_{fv}(t)}{P_c(t)} \right) \quad (28)$$

4.2.2 Límites de potencia del generador diesel

El generador diesel tiene una límite mínimo y máximo de potencia que puede generar en un instante determinado t . El límite superior generalmente se fija como la potencia nominal, mientras que el límite inferior generalmente es 0 kW. Esta restricción se expresa con las siguientes desigualdades:

$$\underline{P}_{gd} \leq P_{gd}(t) \leq \overline{P}_{gd} \quad (29)$$

Donde \underline{P}_{gd} representa el límite inferior y \overline{P}_{gd} el límite superior para el generador.

4.2.3 Carga/descarga de la batería

De manera análoga al generador diesel, el sistema de almacenamiento de baterías también tiene límites de la potencia que puede fluir por él. El límite máximo representa la potencia máxima con que la batería se puede descargar en un instante t , mientras que el límite inferior representa la potencia máxima con que se puede cargar. De acuerdo con la convención escogida, la potencia de descarga es de signo positivo, mientras que la de carga es de signo negativo. Esta restricción de desigualdad se representa así

$$\underline{P_{bs}} \leq P_{bs}(t) \leq \overline{P_{bs}} \quad (30)$$

Donde $\underline{P_{bs}}$ es el valor de potencia máxima de carga y $\overline{P_{bs}}$ es la potencia máxima de descarga.

4.2.4 Estado de carga

El estado de carga es una métrica fundamental en el modelamiento del comportamiento de las baterías. Físicamente, las baterías están limitadas a una carga mínima de 0% y una máxima del 100%, sin embargo, los fabricantes tienen recomendaciones específicas para cada tipo de batería. Para este trabajo, el límite inferior es del 40% mientras que el límite superior se fija al 100%. Esta restricción se expresa así:

$$\underline{SOC} \leq SOC(t) \leq \overline{SOC} \quad (31)$$

Donde \underline{SOC} es el límite inferior de carga de la batería y \overline{SOC} el límite superior. Finalmente, es importante modelar el comportamiento físico de la variación de la energía en las baterías. Es decir, se debe incluir una restricción que tenga en cuenta que la energía en un instante determinado ($E_{bs}(t)$) depende de la energía que hubo en el instante anterior ($E_{bs}(t - 1)$) menos la energía que fluyó de la batería ($P_{bs}(t - 1)\Delta t$) en el intervalo anterior. Matemáticamente, esto se expresa así:

$$E_{bs}(t) = E_{bs}(t - 1) - P_{bs}(t - 1)\Delta t \quad (32)$$

Donde Δt representa la duración de cada instante, es decir, una hora.

4.2.5 Cantidad de Componentes

Esta es la restricción más obvia, sin embargo, se debe especificar que el número de componentes es mayor que cero para que el algoritmo de solución no arroje valores negativos.

Esta restricción se formula así:

$$C_{fv} \geq 0 \quad (33)$$

$$C_{wt} \geq 0 \quad (34)$$

$$C_{gd} \geq 0 \quad (35)$$

$$C_{bs} \geq 0 \quad (36)$$

Esta restricción se satisface al garantizar que la cantidad de componentes dentro del conjunto de combinaciones del análisis sea un número no negativo.

4.3 Energy Management Strategy y despacho

La columna vertebral de las formulaciones basadas en reglas es la estrategia de gestión de potencia de las fuentes de generación y almacenamiento en lo que se conoce como *Energy Management Strategy* (EMS). Esta sección describe las reglas y el despacho seguidos para gestionar la generación y atención de la carga, así como los criterios para el despacho de la generación diesel y el sistema de baterías. La EMS tiene tres etapas denominadas exceso de renovables, despacho óptimo horario y atención marginal de la carga. La lógica de esta estrategia se basa en la estrategia conocida como ciclo de carga y lo presentado por otros autores (Bukar et al., 2019), donde se prioriza el uso de la potencia de las renovables, se cargan las baterías con energía renovable y se optimiza el despacho del GD y el BESS horario teniendo en cuenta las emisiones y su degradación. Esta estrategia se ejecuta hora a hora, por lo que la secuencia de

acciones se resuelve en un bucle para cada hora de los 5 años, por cada combinación. El flujo de acciones de la estrategia es la siguiente:

1. Se cargan los datos de una combinación correspondientes a una posible solución, es decir, el número de paneles, turbinas, generadores y baterías.

2. Se calcula la generación de las renovables a partir de los modelos de la subsección 4.4.

3. Se calcula la diferencia entre la generación con renovables y la demanda.

4. Para cada instante t se evalúa lo siguiente:

- a. Exceso de renovables: si la generación renovable es mayor que la demanda, se cargan las baterías. La energía que no admitan las baterías se considera como energía perdida.

- b. Despacho óptimo horario: Si la generación renovable es menor que la demanda, se despacha la potencia de las baterías y el generador de tal manera que se minimice el costo de la energía y la degradación de la batería.

- c. Atención marginal de la carga: en caso de que la capacidad máxima combinada de las baterías y el generador diesel no sea suficiente para atender la demanda, se fijará la salida de potencia de estos equipos a su máximo y se computará demanda no atendida.

5. Se repite el procedimiento para la siguiente combinación de componentes la MG.

Una vez terminado el proceso iterativo de esta EMS, se calculan los indicadores de confiabilidad, las emisiones, los costos, reemplazos y demás información relevante sobre la posible solución.

4.4 Modelos matemáticos

Esta sección presenta los modelos que permiten convertir los recursos primarios a potencia de salida para las fuentes renovables, el modelo usado para el sistema de baterías y la relación

entre potencia demandada por el generador diesel y su consumo de combustible, necesarios para el algoritmo de *energy management* implementado.

4.4.1 Turbinas Eólicas

El cálculo de la potencia generada por las turbinas se hace de acuerdo con la velocidad del viento y el modelo cúbico con velocidades de corte inferior y superior (Bukar et al., 2019).

Matemáticamente, este modelo se describe así:

$$P_{wt}(t) = \begin{cases} 0 & , V < V_{C_{in}} \wedge V > V_{C_{out}} \\ C_{wt}PN_{wt} \left(\frac{V(t)^3 - V_{C_{in}}^3}{V_R^3 - V_{C_{in}}^3} \right) & , V_{C_{in}} \leq V < V_R \\ C_{wt}PN_{wt} & , V_R \leq V < V_{C_{out}} \end{cases} \quad (37)$$

donde, PN_{wt} y V_R son la potencia nominal en kW y velocidad nominal m/s de la turbina, respectivamente. $V(t)$, $V_{C_{in}}$, $V_{C_{out}}$ y representan, respectivamente, la velocidad del viento en el instante t , la velocidad de corte inferior y la velocidad de corte superior en m/s.

4.4.2 Generador Fotovoltaico

El modelo escogido es el modelo simplificado (Bukar et al., 2019). En este modelo se tienen en cuenta los parámetros del fabricante, la irradiancia y la temperatura para calcular la potencia de salida así:

$$P_{fv} = C_{fv}\eta_{fv}A_{fv}I(t) \left(1 - \left(\frac{k_p}{100} \right) (T_c(t) - T_{STC}) \right) \quad (38)$$

Donde $P_{fv}(t)$, $I(t)$ y $T_c(t)$ representan la potencia generada en kW, la irradiancia en kW/m² y la temperatura de la celda en °C en un instante t . η_{PV} , A_{PV} , k_p y T_{STC} son parámetros que representan la eficiencia, el área efectiva en m², la constante de temperatura en 1/°C y la temperatura STC del panel en °C, respectivamente.

4.4.3 Sistema de Baterías

Como se infiere de la EMS, la salida/entrada de potencia de las baterías depende de su estado de carga, sus límites de potencia y la etapa del EMS en que se encuentre el sistema, así:

Exceso de renovables. Este es el único escenario en que las baterías absorben potencia. Esta inyección de potencia estará limitada por el SOC y la potencia máxima de carga de la batería.

$$P_{bs}(t) = P_{wt} + P_{fv} - P_c \quad (39)$$

Despacho óptimo horario. Si la generación de las renovables es insuficiente para satisfacer la demanda en un instante t , se decidirá el despacho de las baterías junto al diesel, minimizando el costo de la generación en dicho instante. El costo de generar con las baterías estará asociado con la degradación de dicho elemento así:

$$C_{bs}(t) = \frac{p_{bs}}{ET_{bs}} P_{bs}(t) \Delta t, P_{bs}(t) > 0 \quad (40)$$

Donde p_{BS} es el precio de compra y ET_{BS} es el *energy throughput* de la batería. Esta ecuación asigna un precio a los kWh entregado por la batería teniendo en cuenta su vida útil en términos de energía. Este costo no se tiene en cuenta dentro del componente C_{OM} o C_{FC} , pues dentro del cálculo de salvamento y reemplazos, se incluye indirectamente la degradación que sufre el sistema de baterías.

4.4.4 Generador Diesel

Al igual que las baterías, su despacho depende de la EMS. Adicionalmente, importa el consumo de combustible del generador para establecer el costo de su despacho y calcular el componente C_{FC} . Se optó por la función de costo lineal de consumo de combustible presentada a continuación (Lujano-Rojas et al., 2012):

$$FC_{gd}(t) = 0,246P_{gd}(t) + 0,08415CN_{gd} \quad (41)$$

Donde CN_{DG} es la capacidad nominal del generador diesel. Siguiendo la lógica de las baterías, para el generador diesel también se agregó un factor de penalización por la degradación que depende de la energía que podría entregar en toda su vida útil (directamente relacionada con las horas de operación de su vida útil). La función de costo de despacha para el GD es:

$$C_{DG}(t) = p_d FC_{gd} + \frac{p_{gd}}{ET_{gd}} P_{DG}(t) \quad (42)$$

Donde ET_{DG} es la energía total garantizada que el GD puede entregar en toda su vida útil.

4.4 Valores de los parámetros y perfiles

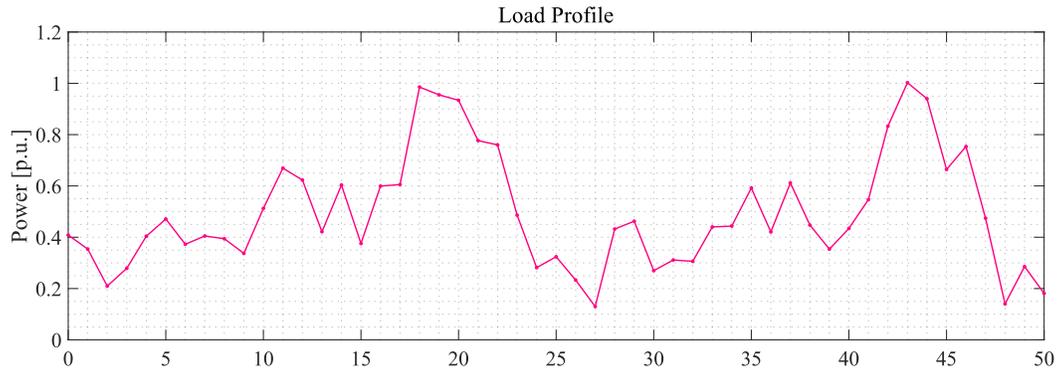
Con el fin de garantizar la reproductibilidad del presente trabajo, se presentan los valores de los parámetros, perfiles y constantes que se consideraron a la hora de abordar el caso de estudio y cuantificar los indicadores. Los parámetros se dividen en dos tipos: técnicos y económicos.

4.4.1 Perfiles de carga y recursos energéticos

El dimensionamiento de la MG se hizo para una ubicación al norte de Colombia, en el departamento de La Guajira (12.154N, 72.063W), ya que es una ubicación con abundantes recursos solares y eólicos (Pasqualino et al., 2015). El perfil de carga se generó a partir de los perfiles típicos residenciales en Colombia. La demanda más alta se da al inicio de la noche (18:00 a 20:00) y es igual 20 kWp, en promedio. El perfil contiene una variabilidad aleatoria del 15%. La Figura 5 presenta el perfil de potencia para dos días.

Figura 5

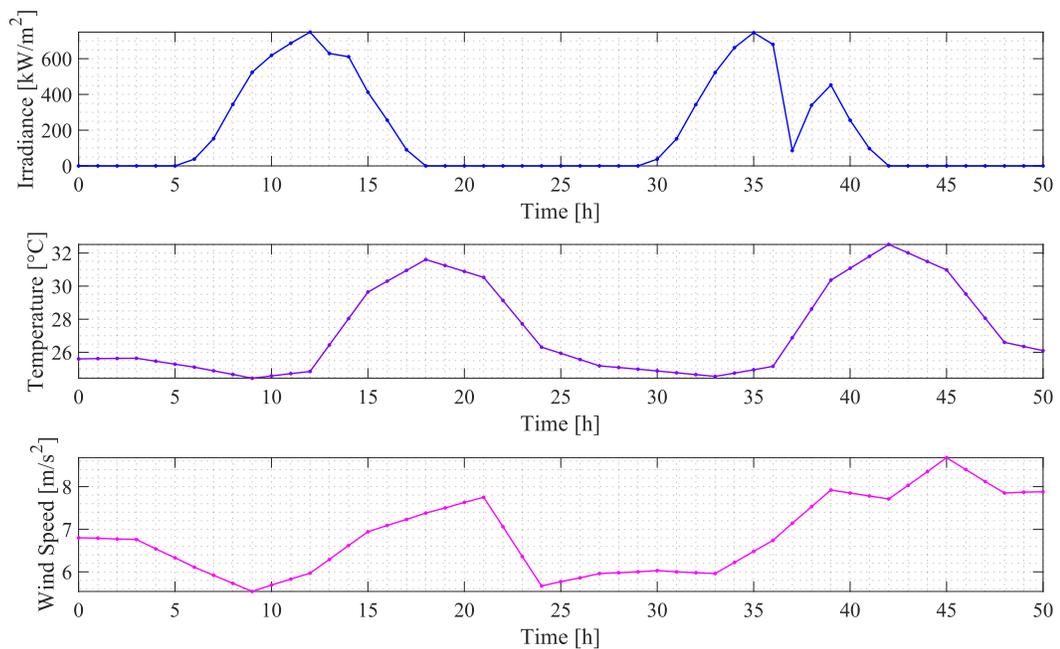
Perfil de carga en por unidad durante 50 horas del periodo de evaluación.



Los recursos energéticos hacen referencia a las variables climatológicas que afectan la generación renovable. Para este trabajo, se tiene en cuenta la irradiancia, velocidad del viento y temperatura ambiente horaria. Estos datos fueron obtenidos de EU Science Hub. La Figura 6 presenta el perfil de irradiancia, velocidad del viento y temperatura para dos días cualquiera.

Figura 6

Perfiles de radiación solar, temperatura y velocidad del viento para dos días.



4.4.2 Parámetros económicos

Los parámetros económicos son todos aquellos valores constantes necesarios para realizar los cálculos de costos. La Tabla 10 resume los parámetros económicos implementados en las ecuaciones del problema.

Tabla 10.
Parámetros económicos para las especificaciones del problema.

Descripción	Parámetro	Valor	Unidad
GD - precio capital	p_{gd}	5.000	USD/unidad
WT - precio capital	p_{wt}	40.000	USD/unidad
PV - precio capital	p_{fv}	714	USD/unidad
BS - precio capital	p_{bs}	3057	USD/unidad
GD - precio de O&M	OM_{gd}	0,17	USD/h
WT - precio de O&M	OM_{wt}	450	USD/unidad/año
PV - precio de O&M	OM_{fv}	10,21	USD/unidad/año
BS - precio de O&M	OM_{bs}	147	USD/unidad/año
Tasa de descuento real	i_f	6,6	%
Precio del diesel	p_d	0,7889	USD/L

4.4.3 Parámetros técnicos

Estos parámetros están asociados con los modelos matemáticos de los REDs y las restricciones. La Tabla 11 recoge estos parámetros.

Tabla 11
Parámetros técnicos para las especificaciones del problema.

Descripción	Parámetro	Valor	Unidad
WT – Velocidad de corte inferior	V_{Cin}	3	m/s

WT – Velocidad de corte superior	$V_{C_{out}}$	20	m/s
WT – Potencia nominal	PN_{wt}	10	kW
WT – Velocidad nominal	V_R	10	m/s
FV - Eficiencia	η_{fv}	0.175	-
FV - Área	A_{fv}	1.944	m ²
FV – Constante de temperatura	k_p	-0.35	-
FV – Temperatura STC	T_{STC}	25	°C
SOC mínimo	\underline{SOC}	40	%
SOC máximo	\overline{SOC}	100	%
BS – Potencia mínima	$\underline{P_{bs}}$	-3	kW
BS – Potencia máxima	$\overline{P_{bs}}$	5	kW
BS – Capacidad nominal	CN_{bs}	9.8	kWh
BS – Energy throughput	ET_{bs}	30,000	kWh
GD – Vida útil	LT_{gd}	15000	h
GD – Vida útil en energía	ET_{gd}	63,750	kWh
GD – Potencia nominal	CN_{gd}	5	kW

5. Impacto del ACV en el dimensionamiento

La solución del problema de dimensionamiento arrojó una serie de resultados que permiten analizar el impacto de considerar el ACV. Este capítulo presenta y discute los resultados obtenidos más relevantes de este trabajo de investigación. En primer lugar, se presentan los datos de 6 indicadores que permiten comparar el desempeño entre un dimensionamiento económico y uno donde el impacto ambiental sea el menor posible. Seguidamente, se presenta la operación de ambas soluciones para una semana. Finalmente, se analizará el frente de Pareto, examinándose el comportamiento de los indicadores de desempeño y los impactos ambientales en las soluciones que pertenecen al frente. Al final del capítulo se resumen los hallazgos más relevantes.

5.1 Solución económica y solución ambiental.

En este capítulo, por “solución económica” (SE), se entiende aquella solución que representa el menor costo posible para el planteamiento dado. Por otra parte, la “solución ambiental” (SA) es aquella solución donde se obtiene el impacto ambiental mínimo posible. En esta sección se presentan algunos indicadores de desempeño de ambas soluciones que permiten estudiar la diferencia relativa en cuanto a costos, confiabilidad, impacto ambiental, entre otros, de ambas soluciones. Asimismo, se presenta el reparto de potencia de ambas soluciones para una semana. La Tabla 12 presenta los resultados de ambas soluciones:

Tabla 12

Indicadores de desempeño para la SE y la SA del problema de dimensionamiento.

COMPOSICIÓN	SOLUCIÓN ECONÓMICA				SOLUCIÓN AMBIENTAL				DIFERENCIA PORCENTUAL (%)			
	C_{fv}	C_{wt}	C_{gd}	C_{bs}	C_{fv}	C_{wt}	C_{gd}	C_{bs}	C_{fv}	C_{wt}	C_{gd}	C_{bs}
	42	1	2	3	110	2	1	30	+72	+1	-1	+27

COSTO (USD)	99.016	158.100	+59,67
ECOSYSTEM IMPACT	9,20E-4	3,19E-4	-65,33
LPSP (%)	3,90	1,29	-66,92
ENERGÍA PERDIDA (%)	6,33	51,52	713,90%
CONSUMO DE DIESEL (L)	45064	3448	-92,35
FRACCIÓN DE RENOVABLES (%)	62,76	98,10	+35,34

Nota: El porcentaje de energía perdida se calculó respecto a la energía demandada por la carga. Por otra parte, las unidades del *ECOSYSTEM IMPACT* (ESI) son especies – año. Finalmente, la DIFERENCIA PORCENTUAL se calculó para todos los indicadores excepto para los valores de la fila COMPOSICIÓN, donde el valor en dicha columna corresponde con la diferencia simple entre las cantidades de cada componente para cada solución.

Como se esperaba, para que la solución provoque menos impacto deberá incluir mayor cantidad de fuentes renovables y menor generación diesel, sin embargo, esto implica un crecimiento en los costos. En este caso particular, la SA tiene un costo 60% mayor, a cambio de un impacto ambiental 65% menor. Este *trade-off* entre objetivos de optimización impacta otros indicadores de desempeño, como el caso de la Energía Perdida, que en la SA es más de 7 veces mayor a la SE, pero que representa una reducción del 92% del consumo de combustible. Finalmente, la SA es un 67% más confiable, mientras que la fracción de energía renovable en la SA es un 35% mayor que en la SE.

En cuanto a la operación, la presencia de una mayor cantidad de renovables en la SA es evidente (ver Figura 7 y Figura 8). Mientras que en la SE la generación con diesel es usual, no se presenta generación de este tipo en ningún momento para la SA. Otra cosa que salta a la vista es la dependencia de la SA a la generación FV, que logra picos de más de 40 kW, pero que solo se aprovecha una parte y el resto se computa como energía perdida. Por tanto, energéticamente, la SE parece balancear mejor las fuentes de generación que la SA.

Figura 7.
Distribución de la potencia generada y carga de la SE para una semana.

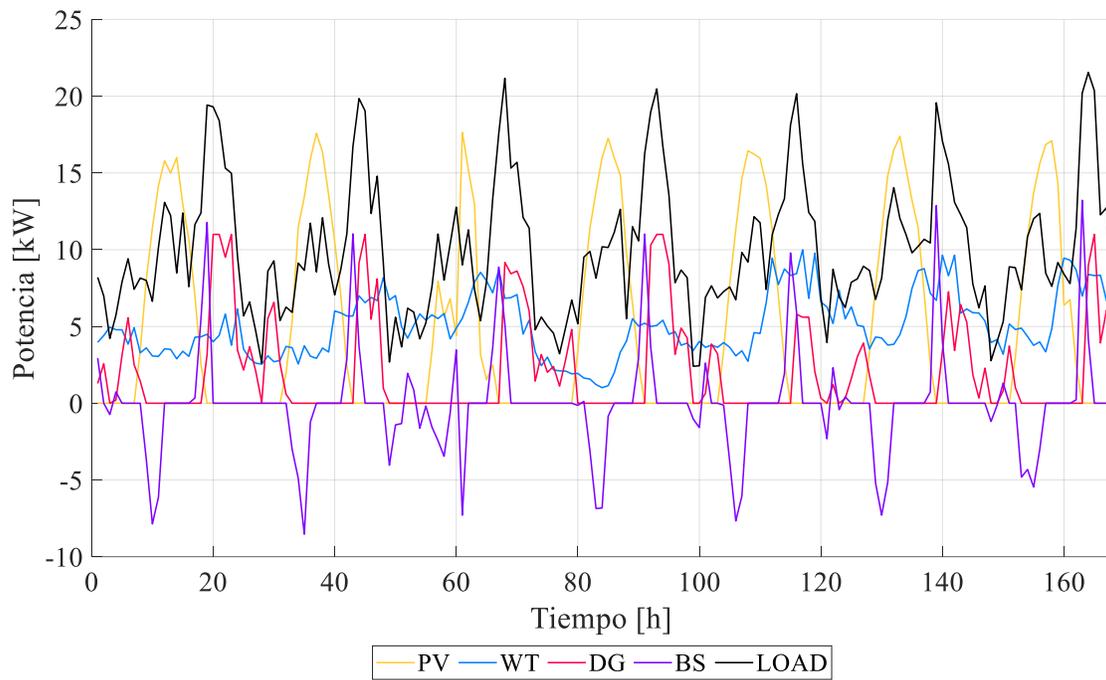
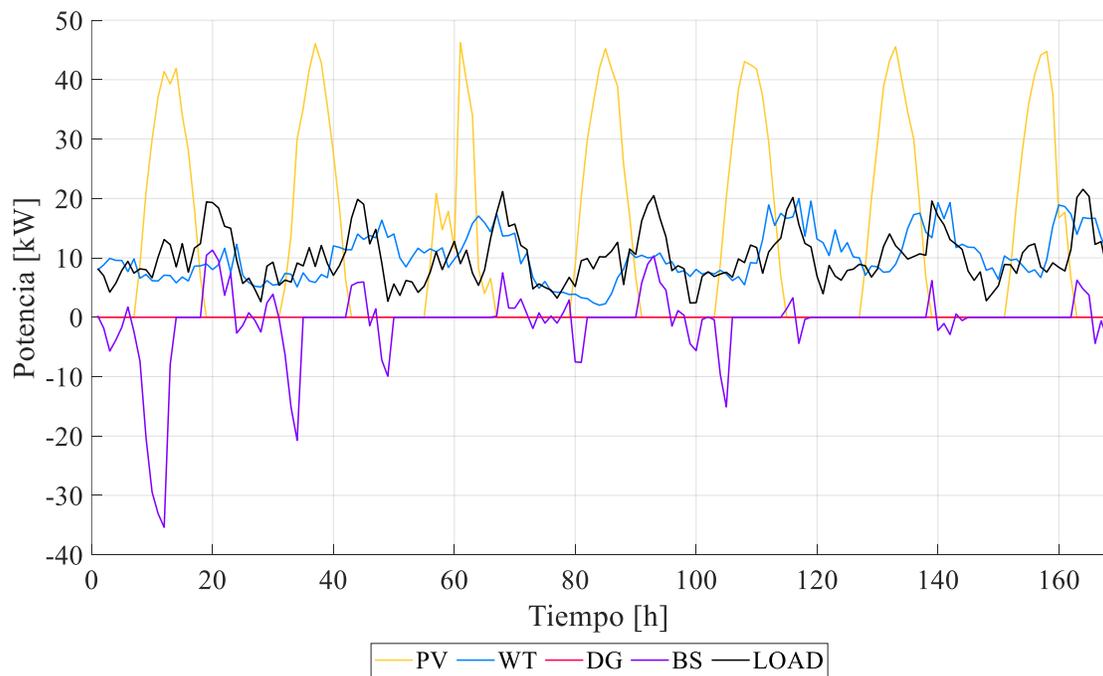


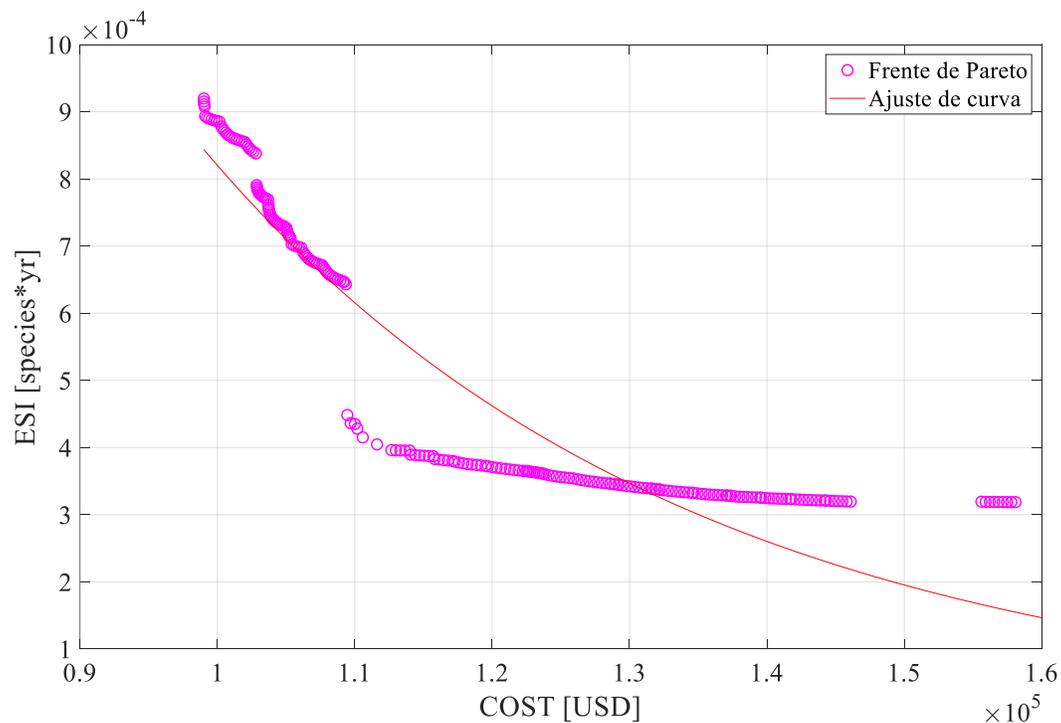
Figura 8
Distribución de la potencia generada y carga de la SA para una semana.



5.2 Frente de Pareto e Indicadores de Desempeño

Esta sección presenta el Frente de Pareto que se forma al confrontar el costo de la solución con su impacto ambiental. Adicionalmente, se presenta el comportamiento de los indicadores de desempeño en cada una de las soluciones del frente, siempre organizadas de acuerdo con el costo ascendente. El objetivo de estas gráficas es observar la relación entre los indicadores de desempeño (LPSP, energía perdida, consumo de combustible, etc.) y las soluciones del frente. Para observar mejor la evolución, todos estos indicadores se grafican contra el costo de la solución, por lo que estará implícito que conforme aumenta el costo de una solución en las figuras, disminuye el Ecosystem Impact (ESI – impacto ambiental total). La Figura 9 presenta el Frente de Pareto con las soluciones óptimas de acuerdo con los objetivos económico y ambiental.

Figura 9
Frente de Pareto y ajuste exponencial de los puntos del frente.



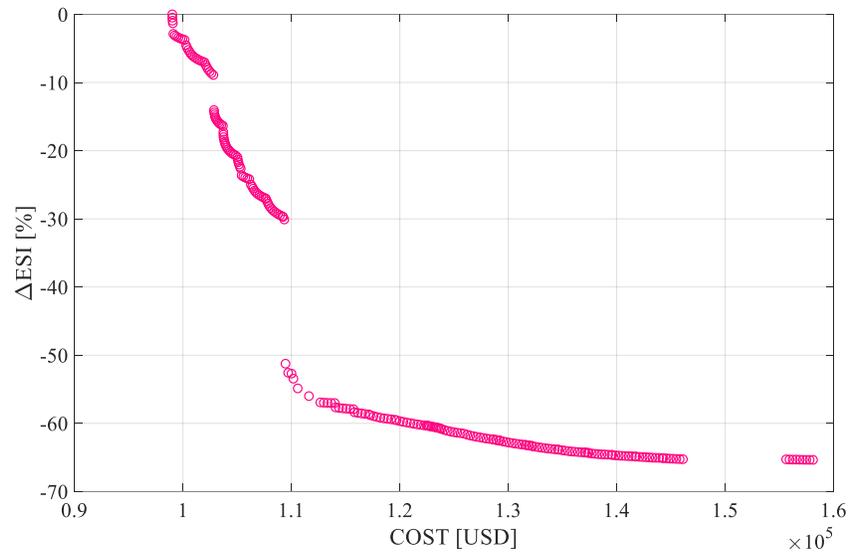
Nota: Se presenta un ajuste exponencial de manera ilustrativa. La ecuación de esta curva es $f(x) = ae^{bx}$, donde $a = 0,01446$ y $b = -2.87e-05$.

El frente corrobora la relación contradictoria de los objetivos: una reducción en el costo implica mayor impacto ambiental. De la figura anterior destaca dos conjuntos de soluciones, las soluciones ubicadas arriba a la izquierda (cuyo ESI es mayor a $6E-4$ especies – año) y las restantes ubicadas abajo al centro y a la izquierda. Las primeras se caracterizan por una variación más abrupta de ESI que las segundas, cubriendo valores entre los $6,2E-4$ especies – año y los $9,2E-4$ especies – año; mientras que las segundas corresponden a soluciones cuyo costo incrementa de $1,09E4$ USD hasta $1,58E4$ USD mientras que el ESI apenas ocupa valores entre $3,2E-4$ y $4,5E-4$. Así, solo en el primer grupo se da la mayor disminución de impacto ambiental respecto al aumento del costo. Finalmente, cabe destacar que la solución denominada SE se ubica en el extremo derecho del frente, mientras que la solución SA se ubica en el extremo izquierdo.

Interesa conocer cómo es el comportamiento de los indicadores de desempeño para cada una de las soluciones del frente, con el fin de identificar algún tipo de tendencia. En primer lugar, la Figura 10 presenta la variación porcentual relativa del ESI de las soluciones respecto al ESI de la solución más barata. Como se observó de la anterior figura, el ESI disminuye ampliamente en el primer conjunto de soluciones, donde una disminución de hasta el 50% con un aumento del costo de apenas el 10%; una mayor disminución del ESI implica crecimiento pronunciados en los costos.

Figura 10

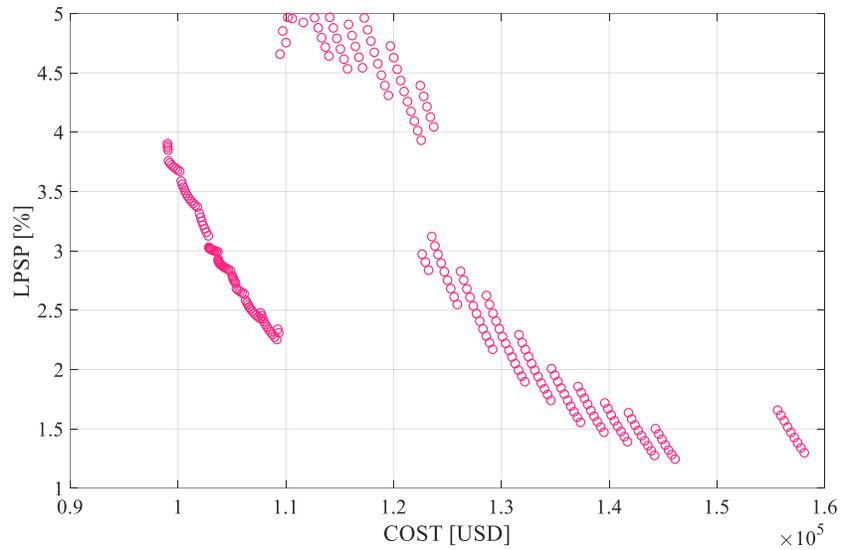
Variación porcentual relativa del ESI respecto al ESI de la SE para todas las soluciones del frente.



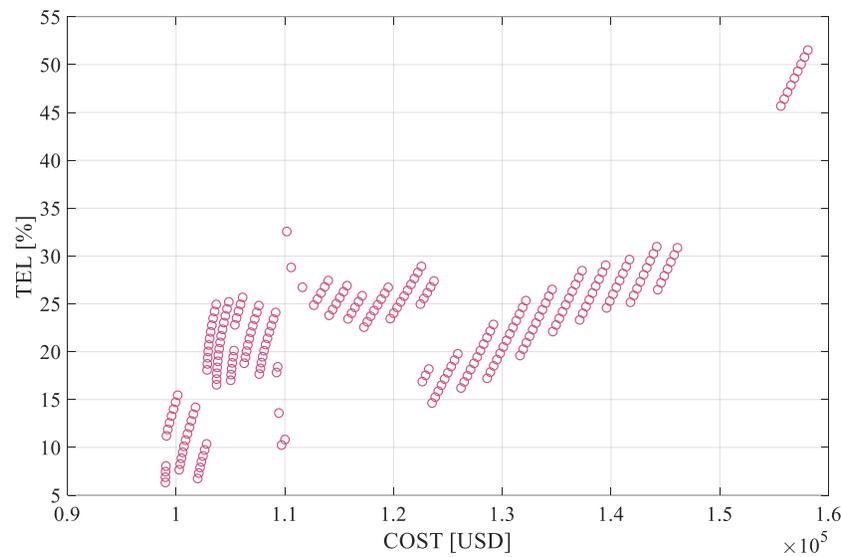
La Figura 11 presenta el LPSP, se evidencia una tendencia a la disminución con el aumento del precio, con los mismos dos grupos diferenciados. Si bien todas las soluciones cumplen con la restricción del LPSP mínimo, ninguna solución atiende la carga sin falla durante todas las horas del año. La Figura 12 presenta la energía perdida, es decir, la energía generada por las renovables y que no se aprovecha. Esta figura muestra un crecimiento pronunciado del TEL, que evidencia que con el aumento de la generación renovable aumenta el desperdicio de energía, así, la disminución del uso del diesel conlleva menos impactos ambientales pero mayor energía no aprovechable.

Figura 11

Confiabilidad expresada en términos del LPSP de las soluciones del frente.

**Figura 12**

Energía total perdida (TEL) de cada solución del frente.

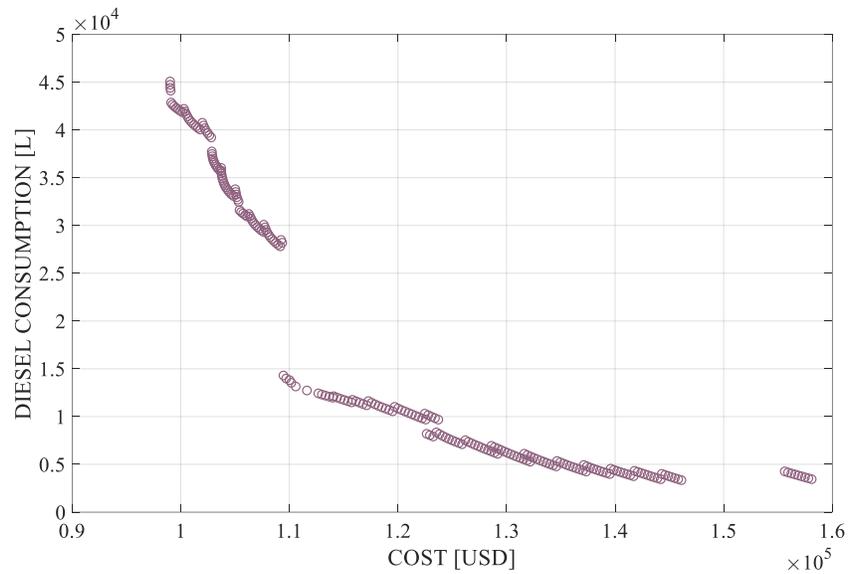


La Figura 13 presenta el consumo del combustible diesel de cada solución. Lo primero que salta a la vista con esta gráfica es su correlación con el frente de Pareto en sí mismo, lo que prueba el impacto positivo que tiene el consumo de este combustible en los costos y el impacto negativo que tiene en el medio ambiente. Finalmente, la Figura 14 presenta la fracción de energía renovable

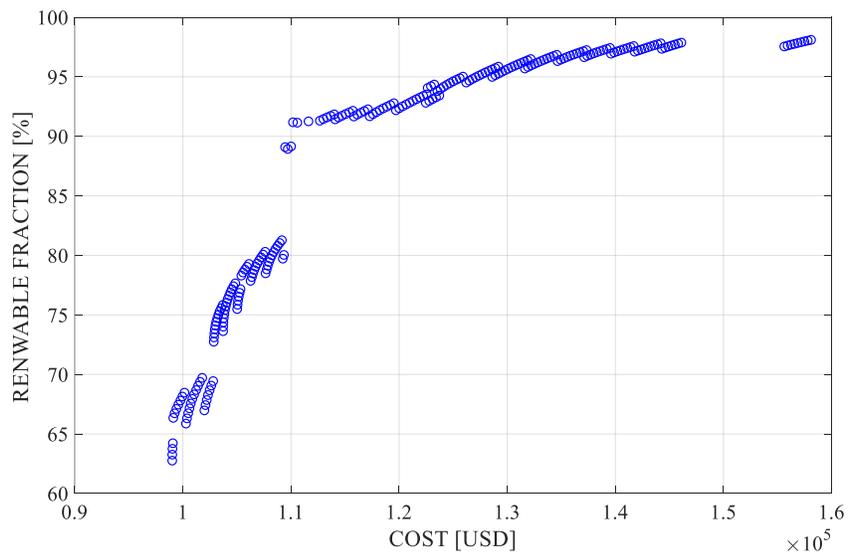
que se generó respecto al total de energía generada. Se evidencia un crecimiento continuo de esta fracción desde las SE hasta la SA donde casi alcanza el 100%, reforzando la idea y la importancia de la generación diesel en el desempeño del sistema.

Figura 13

Consumo del combustible diesel para cada solución del frente.

**Figura 14**

Fracción de energía generada por renovables para cada solución del frente.



5.3 Composición del impacto ambiental en el frente de Pareto

En esta sección se presentan las soluciones del frente de Pareto en dos gráficas de barras apiladas, donde se muestra, para cada solución que pertenece al frente de Pareto, la composición de su impacto ambiental total de acuerdo con la categoría del impacto (Figura 15) y de acuerdo con la tecnología (Figura 16). Por un parte, estas gráficas permiten observar qué tanto aporta categoría de impacto ambiental al ESI total; y, por otra parte, se muestra qué tanto contribuye cada tecnología al impacto ambiental total.

Figura 15

Soluciones del frente de Pareto con el impacto ambiental discriminado por tipo de impacto.

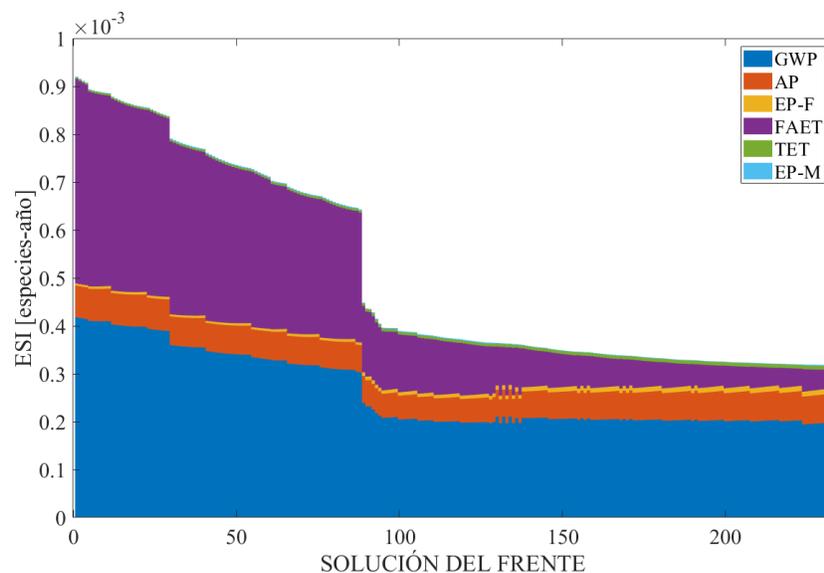
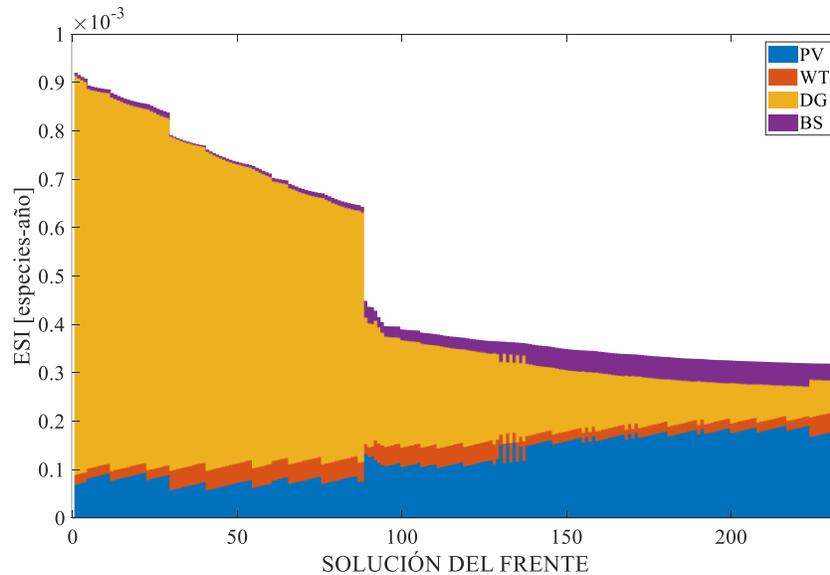


Figura 16

Soluciones del frente de Pareto con el impacto ambiental discriminado por el impacto de cada tecnología.



A partir de la Figura 15 se evidencia la importancia de considerar el impacto ambiental de otras categorías distintas a aquella relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero, pues en muchas de las soluciones la suma del resto de impactos supera al GWP. También se observa que la ecotoxicidad de fuente hídricas (FAET) es una gran causante del impacto ambiental, así como el potencial de acidificación (AP), no obstante, disminuye el ESI total, el GWP toma mayor peso y los demás impactos pierden relevancia.

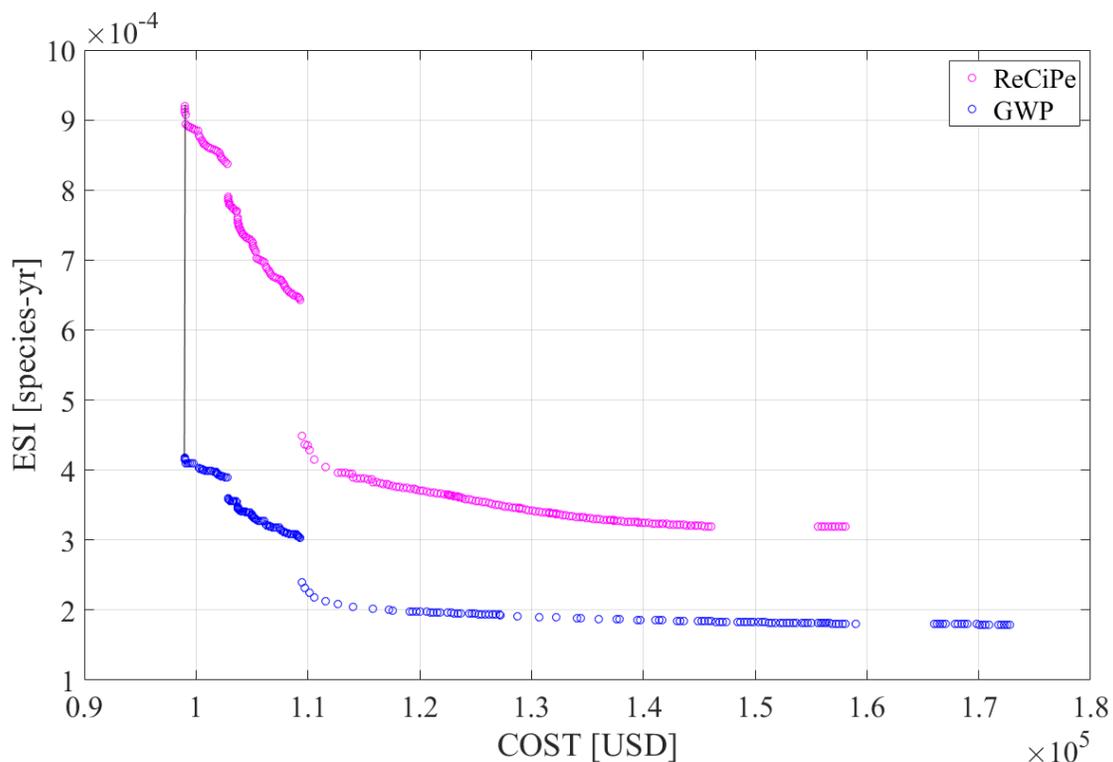
Por otra parte, la Figura 16 evidencia la responsabilidad de la generación diesel en el impacto ambiental, donde, en la solución con mayor penetración de generación diesel, el impacto de esta tecnología es superior al 70% del impacto total. En ausencia de la generación diesel, los sistemas fotovoltaicos pasan a ser la principal fuente de contaminación. Las baterías tienen una participación relevante en las soluciones con menor impacto mientras que la generación eólica tiene un impacto más bien reducido.

5.4 Enfoque propuesto vs. enfoque basado en solo GWP

El último análisis realizado se hizo para observar el comportamiento del frente de Pareto si sólo las emisiones de gases de efecto invernadero se consideran a través del GWP y expresado en términos de ESI. El fin de esto es cuantificar la subestimación del ESI si solo este el GWP es calculado, tal y como es habituales en la literatura especializada relacionada. La Figura 17 presenta los frentes de Pareto generados del dimensionamiento considerando todos los estresores y sólo el GWP.

Figura 17

Frentes de Pareto para el enfoque considerando ReCiPe y para el enfoque considerando solo GWP.



En primer lugar, se tiene en cuenta que la solución económica es la misma para ambas formulaciones. Sin embargo, el ESI estimado en el que solo GWP se considera es 54.60% menor. Esta brecha disminuye, pero el impacto ambiental sigue siendo subestimado pues la diferencia media entre el impacto ambiental de ambas soluciones es 48.40%. Además, las soluciones que

componen los dos frentes de Pareto no son exactamente iguales, es decir, considerando solo GWP en la formulación conduce a configuraciones (posibles soluciones) de la microrred diferentes de aquellas cuando considerando el enfoque LCA, como se muestra en la Fig. 12, donde la solución ambiental es diferente en ambos casos. Adicionalmente, el frente de Pareto del LCA considera más opciones que el frente considerando solo el GWP. Así, considerar únicamente el GWP en la formulación del problema de *sizing* conduce inevitablemente a subestimar el impacto ambiental del sistema en su utilidad la vida. Es importante aclarar que los resultados obtenidos fueron considerando el GWP de todos los DER; si tan solo el GWP hubiera sido considerado la quema de combustible, el ESI de esta solución sería han sido aún más bajos.

5.5 Discusión de resultados

Como en todos los problemas de dimensionamiento, definir una solución como la mejor dependerá de las expectativas y la factibilidad de cada solución, que son subjetivas. Por esto, se abordó el análisis de los resultados desde el enfoque del frente de Pareto, donde no solo se considera la SE y la SA, sino que también se estudió el comportamiento de soluciones intermedias. En primer lugar, se destaca la comparación simple entre indicadores de desempeño entre los extremos del frente de Pareto, observándose que el impacto ambiental se puede reducir significativamente a cambio de impactar en los costos y aumentar el desperdicio de energía; a través de la reducción del consumo del combustible y el aumento de la penetración de renovables, principalmente de fotovoltaica.

Al analizar las soluciones del frente de Pareto, también se identificaron tendencias claras en los indicadores clave: el consumo de combustible, la TEL y la fracción de renovables. El consumo de combustible está fuertemente correlacionado con el ESI y el costo, así como la TEL

y la fracción de renovable tiende a aumentar para reducir el impacto ambiental. Por otra parte, la operación del sistema para la SE muestra un balance entre las distintas fuentes de generación de energía, mientras que para la SA se destaca la dependencia del sistema fotovoltaico y el almacenamiento de las baterías y la ausencia de la generación diesel.

Al discriminar el ESI por tipo de impacto se encontró que además del GWP, la FAET y el AP contribuyen significativamente al impacto ambiental en todas las soluciones del frente, siendo más significativo en aquellas soluciones con mayor penetración de generación diesel; mientras que el EP y el TET resultaron ser poco significativos para estas tecnologías. Finalmente, debe examinarse con atención la forma del frente y las variaciones del ESI respecto al costo, pues se identificó un conjunto de soluciones que tenían una mejor relación entre disminución del ESI por unidad de aumento del costo.

6. Conclusiones

Este trabajo de investigación presentó una estrategia para el dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos de energía y microrredes, la cual considera las etapas del ciclo de vida dentro del diseño y la planeación, a través de una función multiobjetivo económica y ambiental, analizándose los resultados del dimensionamiento con un frente de Pareto. La culminación del objetivo general de este trabajo permitió concluir que es posible dimensionar microrredes considerando múltiples impactos ambientales de distintas naturalezas en una sola función objetivo, a través de la adaptación de metodologías estandarizadas de análisis de ciclo de vida y con la ayuda de lo reportado por la literatura científica en el tema.

En el desarrollo del trabajo de investigación se han alcanzado los objetivos planteados. En primer lugar, se seleccionó un conjunto de indicadores que describe el impacto ambiental en el ciclo de vida de los recursos energéticos de la microrred. Estos indicadores se definieron gracias a la metodología ReCiPe v1.1 de manera tal que se pudo integrar en una sola función objetivo ambiental, a pesar de ser indicadores de distintas naturalezas y con distintos efectos sobre los ecosistemas. Se destaca que la formulación de la función de impacto ambiental no solo depende de una metodología de análisis de ciclo de vida, sino que están supeditas a la disponibilidad de datos que cuantifique el impacto ambiental de los sistemas de generación de la microrred; por lo que los estudios actualizados sobre el análisis de ciclo de vida de las diversas tecnologías de generación y almacenamiento siguiendo metodologías estandarizadas son necesarios.

La función de impacto ambiental se integró en un problema de dimensionamiento multiobjetivo desde un enfoque basado en reglas realistas, donde la optimización del despacho se hace hora a hora, conforme se dan las condiciones meteorológicas y el estado del sistema evoluciona. Esta formulación resultó ser complicada de implementar, pues la cantidad de

ecuaciones, restricciones y reglas para modelar los principios condicionales que modelan la *energy management strategy*, tal como se vio, son numerosos.

Una vez implementado el problema en MATLAB, el análisis de resultados del caso de estudios permitió evidenciar la existencia de múltiples soluciones, desde unas con un impacto ambiental considerablemente menor (respecto al caso de referencia) a cambio una elevación poco significativa en los costos, hasta la solución con el mínimo impacto, pero con una gran elevación en los costos. En cualquier caso, cualquier reducción del impacto ambiental no solo hay que ‘pagarlas’ en costos sino también en energía renovable no aprovechada.

Finalmente, se analizó la composición del frente de Pareto para distinguir la aportación de cada tipo de tecnología al impacto ambiental total, así como la aportación de cada tipo de impacto. Destaca de esto que el impacto ambiental de la generación diesel es crítico y la reducción de la generación diesel por sí sola tiene la capacidad de mejorar el desempeño ambiental de una microrred. Por otra parte, se probó que solo valorar el impacto ambiental de un sistema de generación desde el punto de vista de la emisión de gases de efecto invernadero implica subestimar el impacto real de estas tecnologías en los ecosistemas naturales. Otros impactos como las emisiones de agentes tóxicos o la acidificación también representan un impacto significativo, aunque sí existan otros como la eutroficación que puede ser despreciables.

Como trabajo futuro se considera pertinente caracterizar el impacto ambiental de otras tecnologías de generación y almacenamiento usadas en microrredes con el fin de buscar alternativas menos costosas y que reduzcan la energía desperdiciada y el impacto ambiental. Asimismo, resulta importante cuantificar qué tanto impacta en la relación costos/impacto ambiental cada tecnología disponible de celdas fotovoltaicas o baterías. También se debe considerar la factibilidad de usar la función objetivo ambiental planteada como objetivo para la

operación de microrredes, ya que su relación del impacto ambiental con la cantidad de energía generada de cada fuente permite pensar en mejorar el impacto ambiental de sistemas ya dimensionados y en fase de operación.

REFERENCIAS

- Aberilla, J. M., Gallego-Schmid, A., Stamford, L., & Azapagic, A. (2020). Design and environmental sustainability assessment of small-scale off-grid energy systems for remote rural communities. *Applied Energy*, 258(November 2019), 114004. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114004>
- Baharwani, V., Meena, N., Dubey, A., Sharma, D., Brighu, U., & Mathur, J. (2014). Life cycle inventory and assessment of different solar photovoltaic systems. *2014 Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy, PESTSE 2014*. <https://doi.org/10.1109/PESTSE.2014.6805302>
- Bahrani, S., & Mohammadi, A. (2019). Smart Microgrids. In *From Design to Laboratory-Scale Implementation* (1st ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02656-1>
- Benton, K., Yang, X., & Wang, Z. (2017). Life cycle energy assessment of a standby diesel generator set. *Journal of Cleaner Production*, 149, 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.082>
- Biswas, P. P., Suganthan, P. N., Qu, B. Y., & Amaratunga, G. A. J. (2018). Multiobjective economic-environmental power dispatch with stochastic wind-solar-small hydro power. *Energy*, 150, 1039–1057. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.002>
- Bukar, A. L., Tan, C. W., & Lau, K. Y. (2019). Optimal sizing of an autonomous photovoltaic/wind/battery/diesel generator microgrid using grasshopper optimization algorithm. *Solar Energy*, 188(June), 685–696. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.050>
- Cai, J., Ma, X., Li, Q., Li, L., & Peng, H. (2010). A multi-objective chaotic ant swarm optimization for environmental/economic dispatch. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 32(5), 337–344. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.01.006>

- Caro, D. (2019). Carbon Footprint. In *Encyclopedia of Ecology* (pp. 252–257). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10752-3>
- Chen, B., Zhang, X., Zhang, B., Wang, L., Li, W., & Wang, S. (2018). Multi-microgrids system reliability assessment algorithm considering energy dispatch strategy among microgrids. *Energy Procedia*, 145, 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.04.004>
- Curran, M. A. (2018). Life-cycle assessment. *Encyclopedia of Ecology*, 4(January), 359–366.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09700-1>
- FU, Y., JIANG, Y., LI, Z., & WEI, C. (2014). Optimal economic dispatch for micro grid considering shiftable loads. *Proceedings of the CSEE*. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.16.011>
- Ghasemi, A., & Enayatzare, M. (2018). Optimal energy management of a renewable-based isolated microgrid with pumped-storage unit and demand response. *Renewable Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.072>
- Hirsch, A., Parag, Y., & Guerrero, J. (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 402–411.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.03.040>
- Hsu, D. D., O'Donoghue, P., Fthenakis, V., Heath, G. A., Kim, H. C., Sawyer, P., Choi, J.-K., & Turney, D. E. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation. *Journal of Industrial Ecology*, 16(SUPPL.1), S122–S135. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00439.x>
- IEA. (2019). Global Energy & CO2 Status Report: Emissions. In *Iea.org*.
<https://www.iea.org/geco/emissions/>
- International Energy Agency. (2018). *World Energy Outlook - 2018*. WEO 2018.

<https://www.iea.org/weo/>

- Kourkoumpas, D. S., Benekos, G., Nikolopoulos, N., Karellas, S., Grammelis, P., & Kakaras, E. (2018). A review of key environmental and energy performance indicators for the case of renewable energy systems when integrated with storage solutions. In *Applied Energy* (Vol. 231, pp. 380–398). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.043>
- Kumar, A., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2019). Integrated assessment of a sustainable microgrid for a remote village in hilly region. *Energy Conversion and Management*, *180*(October 2018), 442–472. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.084>
- Lian, J., Zhang, Y., Ma, C., Yang, Y., & Chaima, E. (2019). A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems. *Energy Conversion and Management*, *199*(August), 112027. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112027>
- Liang, H., Liu, Y., Li, F., & Shen, Y. (2018). A multiobjective hybrid bat algorithm for combined economic/emission dispatch. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *101*(March), 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.03.019>
- Llano, M. (2015). The Smart Microgrid: An efficient city in miniature. *Universitas Científica*, *Junio*, 30–33.
- Lujano-Rojas, J. M., Monteiro, C., Dufo-López, R., & Bernal-Agustín, J. L. (2012). Optimum load management strategy for wind/diesel/battery hybrid power systems. *Renewable Energy*, *44*, 288–295. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.097>
- Luna-Rubio, R., Trejo-Perea, M., Vargas-Vázquez, D., & Ríos-Moreno, G. J. (2012). Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy*, *86*(4), 1077–1088. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.10.016>

- Ma, Y., Zhou, Y., Zhang, J., & Piao, C. (2018). Economic Dispatch of Islanded Microgrid Considering a Cooperative Strategy Between Diesel Generator and Battery Energy Storage System. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 23(5), 593–599. <https://doi.org/10.1007/s12204-018-1988-8>
- Mahmoud, M. S., & AL-Sunni, F. M. (2015). *Control and Optimization of Distributed Generation Systems*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16910-1>
- Mendecka, B., & Lombardi, L. (2019). Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: A review of simplified models and harmonization of the results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111(April), 462–480. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.019>
- Movahediyan, Z., & Askarzadeh, A. (2018). Multi-objective optimization framework of a photovoltaic-diesel generator hybrid energy system considering operating reserve. *Sustainable Cities and Society*, 41(April), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.002>
- Naderi, Y., Hosseini, S. H., Ghassem Zadeh, S., Mohammadi-Ivatloo, B., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2018). An overview of power quality enhancement techniques applied to distributed generation in electrical distribution networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93(May 2017), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.013>
- Nagapurkar, P., & Smith, J. D. (2019a). Techno-economic optimization and environmental Life Cycle Assessment (LCA) of microgrids located in the US using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 181(December 2018), 272–291. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.072>
- Nagapurkar, P., & Smith, J. D. (2019b). Techno-economic optimization and environmental Life Cycle Assessment (LCA) of microgrids located in the US using genetic algorithm. *Energy*

Conversion and Management, 181(September 2018), 272–291.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.072>

Narimani, H., Razavi, S. E., Azizivahed, A., Naderi, E., Fathi, M., Ataei, M. H., & Narimani, M. R. (2018). A multi-objective framework for multi-area economic emission dispatch. *Energy*, 154, 126–142. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.080>

National Institute for Public Health and the Environment. (2017). ReCiPe 2016 v1.1. In *RIVM Report 2016-0104*. www.rivm.nl/en

Nemati, M., Braun, M., & Tenbohlen, S. (2018). Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming. *Applied Energy*, 210, 944–963. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.007>

Nosratabadi, S. M., Hooshmand, R.-A., & Gholipour, E. (2017). A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 341–363. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.025>

Organización de las Naciones Unidas. (2015a). *Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>

Organización de las Naciones Unidas. (2015b). *Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

Organización de las Naciones Unidas. (2015c). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Organización de las Naciones Unidas. (2019). *Cumbre sobre la Acción Climática ONU 2019*.

<https://www.un.org/es/climatechange/un-climate-summit-2019.shtml>

- Palizban, O., Kauhaniemi, K., & Guerrero, J. M. (2014). Microgrids in active network management—Part I: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.016>
- Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A., & Bahramirad, S. (2015). State of the art in research on microgrids: A review. *IEEE Access*, 3, 890–925. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2443119>
- Pasqualino, J., Cabrera, C., & Vanegas Chamorro, M. (2015). Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe Colombiano. *Prospectiva*, 13(1), 68. <https://doi.org/10.15665/rp.v13i1.361>
- Poudel, R. C., Manwell, J. F., & McGowan, J. G. (2020). Performance analysis of hybrid microhydro power systems. *Energy Conversion and Management*, 215, 112873. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112873>
- Qiu, W., Zhang, J., & Liu, N. (2011). Model and solution for environmental/economic dispatch considering large-scale wind power penetration. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 31(19).
- Rajaei, M., & Tinjum, J. M. (2013). Life Cycle Assessment of Energy Balance and Emissions of a Wind Energy Plant. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(6). <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9637-3>
- Ren, G., Juebo, W., & Wen, H. (2016). Dynamic economic dispatch solution for a microgrid using improved ant colony optimization. *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 9(8), 345–356. <https://doi.org/10.14257/ijgdc.2016.9.8.30>

- Saheb Koussa, D., & Koussa, M. (2016). GHGs (greenhouse gases) emission and economic analysis of a GCRES (grid-connected renewable energy system) in the arid region, Algeria. *Energy*, *102*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.103>
- Sedighzadeh, M., Esmaili, M., Jamshidi, A., & Ghaderi, M. H. (2019). Stochastic multi-objective economic-environmental energy and reserve scheduling of microgrids considering battery energy storage system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *106*(September 2018), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.09.037>
- Seyyedeh-Barhagh, S., Majidi, M., Nojavan, S., & Zare, K. (2019). Optimal Scheduling of Hydrogen Storage under Economic and Environmental Priorities in the Presence of Renewable Units and Demand Response. *Sustainable Cities and Society*, *46*(December 2018), 101406. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.034>
- Shah Danish, M. S., Senjyu, T., Funabashia, T., Ahmadi, M., Ibrahimi, A. M., Ohta, R., Rashid Howlader, H. O., Zaheb, H., Sabory, N. R., & Sediqi, M. M. (2019). A sustainable microgrid: A sustainability and management-oriented approach. *Energy Procedia*, *159*, 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.045>
- Shamachurn, H. (2021). Optimization of an off-grid domestic Hybrid Energy System in suburban Paris using iHOGA software. *Renewable Energy Focus*, *37*, 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.02.004>
- Shi, W., Xie, X., Chu, C. C., & Gadh, R. (2015). Distributed Optimal Energy Management in Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *6*(3), 1137–1146. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2373150>
- Smith, C., Burrows, J., Scheier, E., Young, A., Smith, J., Young, T., & Gheewala, S. H. (2015). Comparative Life Cycle Assessment of a Thai Island 's diesel / PV / wind hybrid microgrid.

Renewable Energy, 80, 85–100. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.003>

Sothea, K., & Kim Oanh, N. T. (2019). Characterization of emissions from diesel backup generators in Cambodia. *Atmospheric Pollution Research*, 10(2), 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.09.001>

Stan, A. I., Swierczynski, M., Stroe, D. I., Teodorescu, R., & Andreasen, S. J. (2014). Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications - An overview. *2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2014, May*, 713–720. <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2014.6850936>

Sun, X., Luo, X., Zhang, Z., Meng, F., & Yang, J. (2020). Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123006. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123006>

Tito, S. R., Lie, T. T., & Anderson, T. N. (2016). Optimal sizing of a wind-photovoltaic-battery hybrid renewable energy system considering socio-demographic factors. *Solar Energy*, 136, 525–532. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.036>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2013). *Plan Indicativo de Expansión de Cobertura 2016-2020*.

Vega, M. I., & Zaror, C. A. (2018). The effect of solar energy on the environmental profile of electricity generation in Chile: a midterm scenario. *International Journal of Energy Production and Management*, 3(2), 110–121. <https://doi.org/10.2495/EQ-V3-N2-110-121>

Vergara, P., López, J. C., Rey, J. M., da Silva, L. C. P., & Rider, M. J. (2019). *Microgrids Design and Implementation* (A. C. Zambroni de Souza & M. Castilla (eds.); 1st ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>

- Wu, H., Liu, X., & Ding, M. (2014). Dynamic economic dispatch of a microgrid: Mathematical models and solution algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.002>
- Xie, J., Yu, J., Chen, B., Feng, Z., Li, J., Zhao, C., Lyu, J., Hu, L., & Gan, Y. (2017). Facility Cultivation Systems “设施农业”: A Chinese Model for the Planet. In *Advances in Agronomy* (1st ed., Vol. 145). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.05.005>
- Xu, J., Wang, F., Lv, C., Huang, Q., & Xie, H. (2018). Economic-environmental equilibrium based optimal scheduling strategy towards wind-solar-thermal power generation system under limited resources. *Applied Energy*, 231, 355–371. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.113>
- Zhang, D., Evangelisti, S., Lettieri, P., & Papageorgiou, L. G. (2015). Optimal design of CHP-based microgrids : Multiobjective optimisation and life cycle assessment. *Energy*, 85, 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.036>
- Zhang, D., Evangelisti, S., Lettieri, P., & Papageorgiou, L. G. (2016). Economic and environmental scheduling of smart homes with microgrid: Der operation and electrical tasks. *Energy Conversion and Management*, 110, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.056>