



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA
DESCARBONIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN
SOSTENIBLE DE HIDRÓGENO VERDE CON
UN ENFOQUE DE ECONOMÍA CIRCULAR**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTORA EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

P R E S E N T A:

**M.C. TANIA ITZEL SERRANO
ARÉVALO**



Director de Tesis:
DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA
Co-Director:
DR. JAVIER TOVAR FACIO

MORELIA MICH.

FEBRERO, 2026

A mis padres, Martha y Raúl... Con todo mi amor y admiración.

*Un poco de ciencia nos aleja de Dios, pero mucha ciencia
nos devuelve a él.*

Louis Pasteur.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme vivir y superarme día con día. A mis padres, Martha y Raúl, por estar presentes cada día de mi vida, por apoyarme en cada decisión que he tomado y por tener siempre las palabras correctas cuando necesito un consejo; por guiarme en este camino del aprendizaje con todo su amor y cariño. Este logro es el resultado de aquella niña que llevaron de la mano en su primer día de escuela. Los amo y los admiro profundamente, porque sin ustedes no sería quien soy hoy; esto es por y para ustedes. A mis hermanos, Karla y Kevin, por ser mis compañeros de vida y por regalarme una sonrisa cuando más la necesito. A mi niñita, por ser ese pilar que todos necesitamos, por llenarme de alegría con sus ocurrencias y por darle sentido a mi vida con tan solo ver su sonrisa y tomar sus manitas. Y a Dorothy, por acompañarme durante todos estos años, por ser esa paz que me hace tan feliz, por desvelarse conmigo estudiando y por enseñarme el amor sin necesidad de palabras; gracias, Hande, por el tiempo que compartimos, siempre vivirás en mi corazón.

Anibal Sierra, gracias por ser parte de mi vida, por enseñarme tanto y por apoyarme en cada una de mis decisiones; por impulsarme a seguir creciendo y a creer en mí. Gracias por tus consejos y por acompañarme de cerca en esta etapa tan importante.

Al Dr. José María, gracias por abrirme las puertas de su grupo de investigación hace ya algunos años, por enseñarme tanto y por compartir generosamente sus conocimientos; por sus consejos, por la dedicación de su tiempo y por impulsarme a crecer y a creer en mí, inspirándome a seguir desarrollándome académicamente. A mi co-asesor, Javier Tovar, por estos años de aprendizaje y por su disposición y compromiso para llevar a cabo este trabajo de investigación. A los doctores, Mariano Martín, Fernando Lira, Fabricio Nápoles y Felipe Alvarado por sus valiosas observaciones y comentarios que fortalecieron este trabajo, por su disponibilidad en cada avance, a pesar de la diferencia horaria, y por todo lo que aprendí de cada uno de ustedes a lo largo de este proceso.

Gracias, Mauro Serrano y Martha Martínez, por estar pendientes a lo largo de todos estos años y por sus constantes palabras de motivación. También agradezco de la manera más sincera a mis tíos, primos y abuelos, por estar siempre cerca y acompañarme con su cariño en cada etapa de este camino.

A mi querida UMSNH, que me aceptó hace ya quince años, gracias por abrirme las puertas de sus instituciones y por brindarme la oportunidad de formarme en sus aulas; siempre estaré orgullosa de ser Nicolaita. A SECIHTI, por su apoyo invaluable, porque sin su respaldo nada de esto habría sido posible. Finalmente, gracias a cada una de las personas que estuvieron presentes a lo largo de este camino; este logro también les pertenece, porque en cada etapa hubo aprendizaje, esfuerzo compartido y la huella de quienes caminaron conmigo en este proceso que marcó profundamente mi vida.

RESUMEN

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA DESCARBONIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE HIDRÓGENO VERDE CON UN ENFOQUE DE ECONOMÍA CIRCULAR

Por

M.C. Tania Itzel Serrano Arévalo

Febrero del 2026

Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega y Dr. Javier Tovar Facio

En el presente proyecto se plantea un enfoque para analizar la transición de productos convencionales hacia esquemas sustentables, considerando que los vectores energéticos de origen renovable pueden sustituir a los procesos tradicionales basados en combustibles fósiles. No obstante, su adopción exige evaluar diversos aspectos, como rutas de procesamiento, equipos, materiales de infraestructura, fuentes de energía y criterios económicos y ambientales. Dado que la transición energética no solo implica sustituir la fuente de energía, sino también gestionar eficientemente los recursos materiales asociados, resulta necesario vincular este análisis con los principios de la economía circular. Se propone un enfoque sistemático para planificar un sistema energético aplicado al proceso de hidrógeno verde, integrando múltiples equipos y sus requerimientos energéticos. Uno de los principios de la economía circular es optimizar el uso de recursos; por ello, la incorporación de indicadores novedosos en este ámbito resulta clave para la planificación eléctrica, al permitir reducir la cantidad de materiales necesarios y, con ello, el uso de recursos no renovables. Este trabajo presenta un modelo de programación matemática de tipo MINLP que introduce métricas rigurosas sobre el consumo de recursos no renovables y la autosuficiencia energética, dimensiones poco exploradas dentro de la economía circular aplicada al sector energético. El modelo determina la selección óptima de infraestructura y capacidades de generación para satisfacer una demanda energética específica y producción de hidrógeno verde. Además, la cuantificación de materiales se normaliza mediante el indicador ADP (Abiotic Depletion Potential), que evalúa el agotamiento de recursos no renovables. El modelo multi-objetivo se resuelve mediante la técnica de programación compromiso lo que permite analizar las compensaciones entre costo total, emisiones de CO₂eq derivadas de la generación energética y los

indicadores de economía circular. Se presenta un caso de estudio para la generación de energía en México y los resultados muestran que la incorporación de estos indicadores mejora el desempeño de los objetivos entre un 84.00% y un 89.96%, y que la optimización reduce el costo total en 76.17% y las emisiones en 48.73% respecto a los valores no deseados. Este trabajo contribuye a la literatura sobre economía circular al demostrar su aplicación en la optimización del sector energético mediante métricas cuantitativas y criterios de sustentabilidad.

Palabras Clave: Optimización, economía circular, hidrógeno verde, energía eléctrica, demanda.

ABSTRACT

STRATEGIC PLANNING FOR DECARBONIZATION IN THE SUSTAINABLE PRODUCTION OF GREEN HYDROGEN BASED ON A CIRCULAR ECONOMY APPROACH

by

M.C. Tania Itzel Serrano Arévalo

February 2026

PhD in Chemical Engineering

Directed by: Dr. José María Ponce Ortega and Dr. Javier Tovar Facio

In this project, an approach is proposed to analyze the transition from conventional products toward sustainable schemes, considering that energy vectors derived from renewable sources can replace traditional processes based on fossil fuels. However, their adoption requires evaluating various aspects such as processing routes, equipment, infrastructure materials, energy sources, and economic and environmental criteria. Since the energy transition not only involves substituting the energy source but also efficiently managing the associated material resources, it is necessary to link this analysis with the principles of the circular economy. A systematic approach is proposed for planning an energy system applied to the green hydrogen process, integrating multiple units and their energy requirements. One of the principles of the circular economy is resource optimization; therefore, incorporating novel circularity indicators becomes essential for energy planning, as it enables a reduction in the amount of material required for infrastructure and, consequently, a decrease in the use of non-renewable resources. This work presents a MINLP-based mathematical programming model that introduces rigorous metrics for non-renewable resource consumption and energy self-sufficiency, dimensions that have been scarcely explored within the circular economy applied to the energy sector. The model determines the optimal selection of infrastructure and generation capacities to meet a specific energy demand and green hydrogen production. Additionally, material quantification is normalized using the ADP (Abiotic Depletion Potential) indicator, which evaluates the depletion of non-renewable resources. The multi-objective model is solved using the compromise programming technique, allowing the analysis of trade-offs among total cost, CO₂eq emissions derived from energy generation, and circular economy indicators. A case study for energy

generation in Mexico is presented, and the results show that incorporating these indicators improves objective performance between 84.00% and 89.96%, and that optimization reduces total cost by 76.17% and CO₂eq emissions by 48.73% compared to undesired values. This work contributes to the circular economy literature by demonstrating its application in optimizing the energy sector through quantitative metrics and sustainability criteria.

keywords: Optimization, circular economy, green hydrogen, electrical energy, demand.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS	XI
NOMENCLATURA.....	XII
GLOSARIO	XVI
1. PRESENTACIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ANTECEDENTES.....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN	8
1.4. OBJETIVOS.....	8
1.5. HIPÓTESIS.....	9
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. INTRODUCCIÓN.....	10
2.2. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	10
2.3. INDICADORES AMBIENTALES EN EL SECTOR ENERGÉTICO	12
2.4. ECONOMÍA CIRCULAR.....	12
2.5. OPTIMIZACIÓN.....	14
3. METODOLOGÍA	15
3.1. INTRODUCCIÓN.....	15
3.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
3.3. FORMULACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTA.....	18
3.4. FORMULACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO.....	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1. INTRODUCCIÓN.....	37
4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA	37
4.3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	37
4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	43
5. CONCLUSIONES.....	52
ANEXOS	55
ANEXO A. ARTÍCULOS Y LIBROS PUBLICADOS	55
ANEXO B. RECONOCIMIENTOS OBTENIDOS	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Integración de la energía renovable dentro de cadenas de conversión energética.	2
Figura 1. 2. Planificación de la producción de vectores energéticos considerando aspectos ambientales, económicos y de EC.....	3
Figura 2. 1. Uso de energía renovable en la producción de H ₂	11
Figura 2. 2. Iniciativas de economía circular en distintas aplicaciones.	13
Figura 3. 1. Representación esquemática de la superestructura propuesta para la generación de energía eléctrica e H ₂	17
Figura 3. 2. Metodología propuesta para la evaluación de aspectos económicos, ambientales e indicadores de EC.	19
Figura 4. 1. Región de transmisión peninsular en México.....	39
Figura 4. 2. Objetivos económicos y ambientales según las métricas de EC	49
Figura 4. 3. Logro en el desempeño de los objetivos económicos y ambientales.....	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4. 1. Parámetros de capacidades de tecnologías y almacenadores de energía (SENER, 2018; INECC, 2020)	41
Tabla 4. 2. Factores de normalización (van Oers et al., 2020; Wernet et al., 2016).	42
Tabla 4. 3. Requerimientos materiales de la infraestructura participante en el sistema.....	43
Tabla 4. 4. Valores no ideales e ideales en la optimización mono-objetivo.	44
Tabla 4. 5. Optimización multi-objetivo.	45
Tabla 4. 6. Autosuficiencia energética en cada una de las regiones.	46

NOMENCLATURA

Índices

i	Almacenador de energía eléctrica / batería
g	Almacenador de H ₂
r	Área geográfica
h	Electrolizador
t	Periodo de tiempo
j	Tecnología de generación de energía
jc	Tecnología de generación de energía convencional de combustóleo como combustible
yg	Tecnología de generación de energía convencional de gas natural como combustible
jt	Tecnología de generación de energía convencionales
jrt	Tecnología de generación de energía renovable
jrh	Tecnología de generación de energía renovable no variable
jr	Tecnología de generación de energía renovable variable

Variables binarias

$\omega_{r,i,t}^{ESS}$	Variable binaria para modelar la carga y descarga de almacenadores de energía eléctrica en un periodo de tiempo específico
$y_{r,i}^{ESS}$	Variable binaria para modelar la existencia de almacenadores de energía eléctrica
$y_{r,g}^{EHS}$	Variable binaria para modelar la existencia de almacenadores de H ₂
$y_{r,h}^{elect}$	Variable binaria para modelar la existencia de electrolizadores
$y_{r,jr}^{RENEW}$	Variable binaria para modelar la existencia de tecnologías renovables variables

Variables

$ep_{r,jc,t}$	Cantidad de combustible necesario en las tecnologías convencionales que utilizan combustóleo, GJ
$ealm_{r,i,t}$	Cantidad de energía contenida en los sistemas de almacenamiento, MWh
$ic_{r,g}^{EHS}$	Capacidad de almacenadores de H ₂ , ton
$ic_{r,h}^{elect}$	Capacidad de electrolizadores, MW
$icess_{r,i}$	Capacidad de sistemas de almacenamiento, MW
$ic_{r,jr}^{renew}$	Capacidad de tecnologías renovables variables, MW
$ep_{r,jg,t}$	Combustible necesario en tecnologías convencionales que utilizan gas natural, GJ
$Capex^{ess}$	Costo de capital de almacenadores de energía eléctrica, US\$
$Capex^{EHS}$	Costo de capital de almacenadores de H ₂ , US\$
$Capex^{elect}$	Costo de capital de electrolizadores, US\$
$Capex^{renew}$	Costo de capital de tecnologías renovables variables, US\$
$CostcapT$	Costo de capital total, US\$
$opex_i^{conv}$	Costo de producción de energía en tecnologías convencionales, US\$

$opex_t^{renw}$	Costo de producción de energía en tecnologías renovables, US\$
$cost_t^{trans}$	Costo de transmisión de energía, US\$
$Opex_t^{ess}$	Costo operacional de almacenadores de energía, US\$
$Opex_t^{EHS}$	Costo operacional de almacenadores de H ₂ , US\$
$Opex_t^{elect}$	Costo operacional de electrolizadores, US\$
$CostopT$	Costo operativo total, US\$
TC	Costo total, US\$
$ep_{r,jt,t}$	Electricidad generada por cada una de las tecnologías convencionales, MWh
$ep_{r,jr,t}$	Electricidad generada por cada una de las tecnologías renovables variables, MWh
$ep_{r,jrh,t}$	Electricidad generada por cada una de las tecnologías renovables variables, MWh
$ep_{r,jrh,t}$	Electricidad generada por cada una de las tecnologías renovables no variables, MWh
$ep_{r,jrt,t}$	Electricidad generada por cada una de las tecnologías renovables, MWh
$Emisiones$	Emisiones totales generadas por las tecnologías convencionales, ton
$ecar_{r,jr,i,t}$	Energía cargada al sistema de almacenamiento de electricidad por tecnologías renovables variables, MWh
$ecar_{r,jrh,i,t}$	Energía cargada al sistema de almacenamiento de electricidad por tecnologías renovables no variables, MWh
$ecar_{r,jrt,i,t}$	Energía cargada al sistema de almacenamiento de electricidad por tecnologías renovables disponibles, MWh
$edes_{r,i,t}$	Energía descargada del sistema de almacenamiento de electricidad, MWh
$edes_{r,i,t}$	Energía descargada del sistema de almacenamiento de electricidad, MWh
$cu_{r,jrt,t}$	Energía no aprovechada en las tecnologías renovables disponibles, MWh
$cu_{r,jrh,t}$	Energía no aprovechada en las tecnologías renovables no variables, MWh
$cu_{r,jr,t}$	Energía no aprovechada en las tecnologías renovables variables, MWh
cuT	Energía no aprovechada total de las tecnologías renovables disponibles, MWh
$umdem_{r,t}$	Energía no suministrada a cada una de las regiones, MWh
$umdemT$	Energía no suministrada total, MWh
$etrans_{r,r',jt,t}$	Energía producida en las tecnologías convencionales y transmitida de una región a una distinta, MWh
$etrans_{r',r,j,t}$	Energía producida en las tecnologías disponibles y transmitida de una región a una distinta, MWh
$etrans_{r,r',jrh,t}$	Energía producida en las tecnologías renovables no variables y transmitida de una región a una distinta, MWh
$etrans_{r,r',jr,t}$	Energía producida en las tecnologías renovables variables y transmitida de una región a una distinta, MWh
$eelec_{r,jrt,h,t}$	Energía renovable de tecnologías disponibles usada por los electrolizadores, MWh
$eelec_{r,jrh,t,h}$	Energía renovable no variable usada por los electrolizadores, MWh
$eelec_{r,jr,t,h}$	Energía renovable variable usada por los electrolizadores, MWh

$Profit^{H_2, gen}$	Ganancias obtenidas por la venta de H ₂ , US\$
$eprodem_{r,jt,t}$	Generación local de las tecnologías convencionales, MWh
$eprodem_{r,j,t}$	Generación local de las tecnologías disponibles, MWh
$eprodem_{r,jrh,t}$	Generación local de las tecnologías renovables no variables, MWh
$eprodem_{r,jr,t}$	Generación local de las tecnologías renovables variables, MWh
$mcom_{r,jc,t}$	Masa de combustóleo que utilizan las tecnologías convencionales, ton
$mgas_{r,jg,t}$	Masa de gas natural que utilizan las tecnologías convencionales, ton
$m_{r,g,t}^{EHS}$	Masa de H ₂ almacenada, ton
$m_{r,h,t}^{H_2, gen}$	Masa de H ₂ generada en los electrolizadores, ton
$m_{r,h,jg,t}^{H_2, burn}$	Masa de H ₂ que utilizan las tecnologías convencionales de gas natural, ton

Parámetros

$M_{r,0,g}^{EHS}$	Cantidad de H ₂ que contiene el almacenador en el tiempo cero, ton
$C_{MAXESS_{r,i}}$	Capacidad de almacenamiento máximo para que se considere la instalación de almacenadores de energía eléctrica, MW
$C_{MINESS_{r,i}}$	Capacidad de almacenamiento mínimo para que se considere la instalación de almacenadores de energía eléctrica, MW
CT	Capacidad de enlace de transmisión de una región a otra distinta, MWh
$CAPROD_{r,jt,t}$	Capacidad de producción de las tecnologías convencionales, MW
$CAPROD_{r,jr,t}$	Capacidad de producción de las tecnologías renovables variables, MW
$CAPROD_{r,jr,t}$	Capacidad de producción de las tecnologías renovables variables, MW
$MAXPROD_{r,jt,t}$	Capacidad máxima de producción de las tecnologías convencionales, MW
$C_{MAXRENEW_{r,jr}}$	Capacidad máxima de producción para que se considere la instalación de tecnologías renovables variables, MW
C_{MAX}^{EHS}	Capacidad máxima para que se considere la instalación de almacenadores de H ₂ , ton
$C_{MAX}^{elect}_{r,h}$	Capacidad máxima para que se considere la instalación de electrolizadores, MW
$MINPROD_{r,jt,t}$	Capacidad mínima de producción de las tecnologías convencionales, MW
$MINPROD_{r,jt,t}$	Capacidad mínima de producción de las tecnologías convencionales, MW
$C_{MINRENEW_{r,jr}}$	Capacidad mínima de producción para que se considere la instalación de tecnologías renovables variables, MW
$C_{MINRENEW_{r,jr}}$	Capacidad mínima de producción para que se considere la instalación de tecnologías renovables variables, MW
C_{MIN}^{EHS}	Capacidad mínima para que se considere la instalación de almacenadores de H ₂ , ton
$C_{MIN}^{elect}_{r,h}$	Capacidad mínima para que se considere la instalación de electrolizadores, MW
$UC_i^{ess-CF-O\&M}$	Costo de operación y mantenimiento fijo en los almacenadores de energía, US\$
$UC_i^{ess-CV-O\&M}$	Costo de operación y mantenimiento variable en los almacenadores de energía, US\$ / MWh
UC_g^{EHS}	Costo operativo unitario de almacenadores de H ₂ , US\$ / tonH ₂

UC_h^{elect}	Costo operativo unitario de electrolizadores, US\$ / tonH ₂
FC_i^{ESS}	Costo unitario de instalación de almacenadores de energía eléctrica, US\$ / MW
FC_h^{elect}	Costo unitario de instalación de almacenadores de H ₂ , US\$ / tonH ₂
FC_h^{elect}	Costo unitario de instalación de electrolizadores, US\$ / MW
FC_{jr}^{renow}	Costo unitario de instalación de tecnologías renovables variables, US\$ / MW
$CTRANS_{r,r'}$	Costo unitario de transmisión de energía de una región a otra distinta, US\$ / MWh
$CPROD_{jt}$	Costo variable de producción en tecnologías convencionales, US\$ / MWh
$CPROD_{jrt}$	Costo variable de producción en tecnologías renovables, US\$ / MWh
$EDEM$	Demanda eléctrica, MWh
η_i^{car}	Eficiencia de carga en los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica
η_i^{des}	Eficiencia de descarga en los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica
η_h^{elect}	Eficiencia de electrolizadores
η^{trans}	Eficiencia de transmisión de electricidad
$\eta_{jc}^{convotr}$	Eficiencia térmica de combustóleo a electricidad
$\eta_{jg}^{comvgas}$	Eficiencia térmica de gas natural a electricidad
$\eta_{jg}^{convH_2}$	Eficiencia térmica de H ₂ a electricidad
$EALM_{r,i}^0$	Energía contenida en los almacenadores de energía en el tiempo cero, MWh
$CF_{r,jr,t}$	Factor de capacidad de las tecnologías renovables disponibles, MWh / MW
$CF_{r,jr,t}$	Factor de capacidad de las tecnologías renovables disponibles, MWh / MW
$EMIS_{jc}$	Factor de emisión de emisiones de CO _{2eq} generadas a la atmósfera por cantidad de combustóleo utilizado, tonCO _{2eq} /ton de combustóleo
$EMIS_{jg}$	Factor de emisión de emisiones de CO _{2eq} generadas a la atmósfera por cantidad de gas natural utilizado, tonCO _{2eq} /ton de gas natural
K^{inv}	Factor utilizado para anualizar la inversión de los equipos
$RUMAX_{jt}$	Fracción de la capacidad instalada que se puede incrementar en un periodo de tiempo
$RDMAX_{jt}$	Fracción de la capacidad instalada que se puede reducir en un periodo de tiempo
$U^{CARBONTAX}$	Impuesto medioambiental sobre las emisiones de CO _{2eq} , US\$ / tonCO _{2eq}
U^{CUT}	Impuesto unitario de la energía no aprovechada, US\$ / MWh
U^{UMDEMT}	Impuesto unitario de la energía no suministrada, US\$ / MWh
$CAPDESC_{r,i}$	Porcentaje de capacidad que pueden descargar los almacenadores de energía
PV_h^{elect}	Precio unitario de venta de H ₂ en cada uno de los electrolizadores US\$ / tonH ₂
$LHVC$	Valor calorífico bajo del combustóleo, GJ/ton
$LHVG$	Valor calorífico bajo del gas natural, GJ/ton
$LHVH$	Valor calorífico bajo del H ₂ , GJ/ton

GLOSARIO

Capacidad instalada: es la cantidad máxima de generación que un sistema puede alcanzar bajo condiciones normales de operación. Representa el límite superior de producción que podría lograrse si todos los equipos disponibles funcionaran a su capacidad nominal.

Costo de capital: es un gasto para crear un beneficio en el futuro, costo distribuido a lo largo de la vida útil del activo, por lo que no se reconoce en un solo momento.

Costo operativo: costos de operación o funcionamiento corresponden a los gastos que se incurren una vez concluida la fase de construcción e instalación de la nueva capacidad productiva, y que se extienden durante toda su vida útil.

Demanda energética: energía requerida en un momento específico.

Economía circular: modelo de producción y consumo de un sistema que implica maximizar los recursos disponibles para que estos permanezcan el mayor tiempo posible en el ciclo productivo.

Hidrógeno verde: Hidrógeno generado a partir de energía renovable. Se diferencia de otros métodos de producción como el del hidrógeno gris, producido a través del reformado con vapor a partir de hidrocarburos, y en particular gas natural.

Modelo determinista: Es un modelo matemático que produce resultados únicos para un conjunto dado de entradas o condiciones iniciales, excluyendo cualquier componente de azar o incertidumbre en el sistema descrito.

Programación no lineal de enteros mixtos: MINLP, por sus siglas en inglés.

Sistema de modelado algebraico general: GAMS®, por sus siglas en inglés.

Tecnologías generadoras de energía: son los sistemas, equipos y procesos diseñados para transformar diversas fuentes primarias en energía útil, principalmente electricidad o calor.

Capítulo I

1. PRESENTACIÓN

1.1. Introducción

En la actualidad, la demanda de productos derivados del petróleo ha aumentado, en especial para actividades como la quema de combustibles en la producción de energía eléctrica, uso residencial, transporte, comercial y servicios, que generan grandes cantidades de emisiones y gases de efecto invernadero, lo que provoca efectos ambientales negativos (ARA, 2024). En este sentido, se considera la implementación de la transición energética de manera sostenible, considerando las energías renovables como materia prima en la generación de productos de alto valor agregado y vectores energéticos, mejorando el potencial económico y disminuyendo el impacto medioambiental de la industria.

Los vectores energéticos son mecanismos que son capaces de almacenar y transportar energía para posteriormente liberarla, esta liberación será de manera controlada. Algunos compuestos son considerados vectores energéticos, como la electricidad, por ser un medio para almacenar y transportar energía, la principal diferencia que tienen estas sustancias con la energía primaria (proveniente de procesos naturales y no ha sido transformada) es que se trata de productos que han sido producidos por medio de energía, vinculándolos a básicamente dos etapas (la primera que permite obtener la energía y la segunda que la libera), estos son los más frecuentes para la electricidad:

Baterías: principalmente las relacionadas con energía renovable, son almacenadoras de energía eléctrica una vez que ha sido generada por instalaciones fotovoltaicas, con la finalidad de ser descargadas cuando la radiación solar sea baja.

Hidrógeno (H_2): Es una molécula capaz de almacenar energía y liberarla cuando sea necesario, esto se logra al separar las moléculas de agua (H_2O) en H_2 y oxígeno (O_2) para conservar la energía. Al quemar el H_2 se obtiene H_2O como residuo, además de ser un combustible limpio. Su principal método de obtención convencional a partir de hidrocarburos es el reformado con vapor y la electrólisis; esta última consiste en la ruptura de las moléculas del H_2O por medio de una corriente eléctrica que se aplica a través de electrodos con la finalidad de

lograr transferencia de electrones, cuando la electrólisis utiliza energía renovable como fuente de alimentación se logra la producción de “hidrógeno verde”.

Amoniaco (NH_3): Es una molécula que permite almacenar energía con gran eficiencia, además de ser incluso más estable y almacenable que el H_2 . Una de las principales aplicaciones del NH_3 es en el sector agrícola para la producción de fertilizantes.

Centrales hidroeléctricas de bombeo: Su principio de operación consiste en almacenar agua en periodos de baja demanda y aprovecharla para producir energía cuando el consumo aumenta. Funciona con dos embalses a distinta altura: cuando sobra electricidad, se bombea agua al embalse superior; cuando se necesita energía, esa agua se deja caer para generar electricidad con turbinas. Es una forma eficiente de almacenar y liberar energía según la demanda (Iberdrola, s.f.).

La energía eléctrica renovable puede aprovecharse en procesos industriales mediante tecnologías Power-to-X (PtX), las cuales permiten convertir esta energía en productos químicos de alto valor agregado y combustibles sostenibles. Estos productos actúan como vectores energéticos, facilitando el almacenamiento y transporte eficiente de la energía en diferentes formas útiles (**Figura 1.1**).

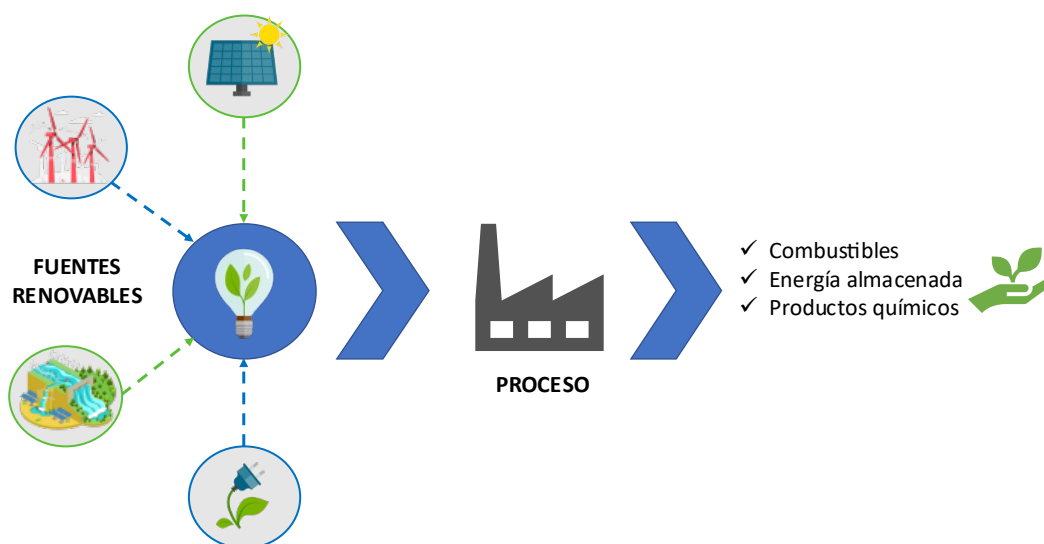


Figura 1. 1. Integración de la energía renovable dentro de cadenas de conversión energética.

La implementación de energía renovable en procesos industriales da la oportunidad de generar productos de valor agregado, lo que permite reemplazar una parte de los métodos convencionales que utilizan combustibles fósiles. Además de la producción de productos de valor

agregado, la generación de vectores energéticos en un esquema sostenible es obligatoria para mejorar el potencial económico de la industria basada en energía renovable. La energía renovable y la producción de vectores energéticos parecen ser una solución viable para reemplazar la energía convencional, pero su implementación requiere el estudio de aspectos importantes, incluida la selección de la fuente de energía, las rutas de procesamiento, infraestructura, costos de dicho proceso, descarga de productos, utilización máxima de recursos, producción máxima de productos químicos de valor agregado, así como muchos otros criterios económicos y de sostenibilidad. También se requiere el estudio conjunto de la economía circular (EC) para promover la reducción del agotamiento de los recursos no renovables. En este sentido, resulta fundamental desarrollar un enfoque integral que, además de aprovechar la energía renovable como fuente primaria, permita el almacenamiento de energía y la incorporación de aspectos económicos, ambientales y de EC, con el fin de optimizar el uso de los recursos en un conjunto de equipos implementados en la producción de vectores energéticos, como el H_2 , dentro de cadenas de suministro (**Figura 1.2**). Precisamente para atender esta necesidad, en el presente trabajo de investigación se plantea el uso de energía renovable en el proceso de producción de H_2 , proporcionando un marco sistemático que integra múltiples equipos de procesamiento y reduce el impacto ambiental mediante el uso de técnicas de optimización.

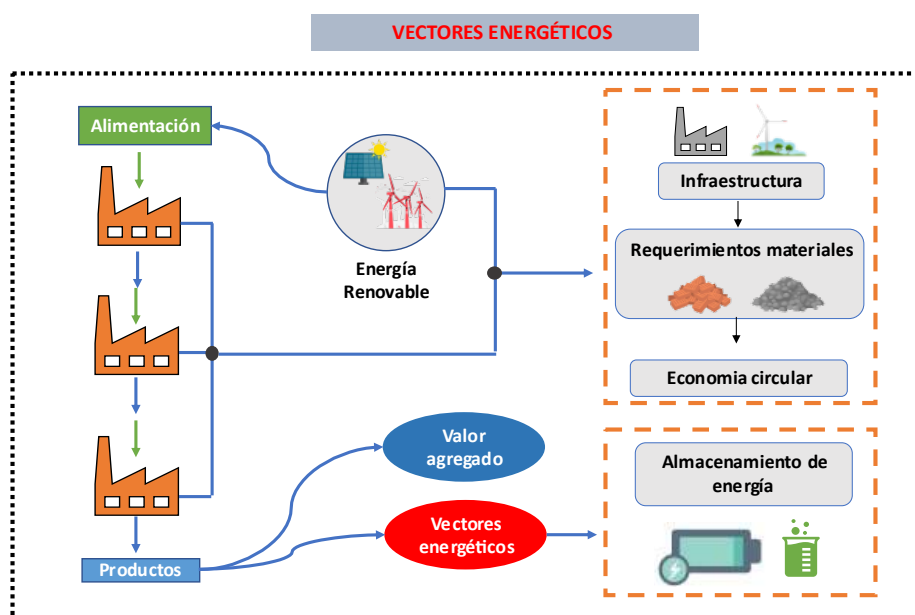


Figura 1. 2. Planificación de la producción de vectores energéticos considerando aspectos ambientales, económicos y de EC.

1.2. Antecedentes

La reciente preocupación en el abuso de combustibles fósiles ha sido objeto de estudio (Martins et al., 2019) debido al desarrollo mundial que se da con su uso principalmente como combustibles en la generación de energía eléctrica en centrales convencionales (Serrano-Arévalo et al., 2020), actividades de transporte, residenciales, comerciales y de servicios. Por otro lado, este tipo de fuentes no renovables produce emisiones contaminantes, lo que implica una amenaza para la mitigación del cambio climático (Johnsson et al., 2019). Considerar la implementación de la transición energética de manera sostenible es un aspecto importante en donde se consideran las energías renovables (Gielen et al., 2019), las cuales representan una oportunidad para establecer un sistema energético sostenible y contribuir a la descarbonización.

Líderes mundiales consideran al H_2 como un vector clave para la descarbonización y para cumplir con los objetivos del sector energético. El consumo global de H_2 en la industria aumentó un 2% en 2022 respecto a 2021 y se proyecta que aumente un 6% anual hasta finales de esta década, alcanzando más de 150 millones de toneladas (Mt) para 2030. Geográficamente, China lidera el consumo de H_2 en aplicaciones industriales a nivel mundial, con una participación del 35%. Le siguen Medio Oriente con un 14%, América del Norte con un 10%, e India con un 9%, destacándose como importantes mercados emergentes en este sector (IEA, 2023). El H_2 se utiliza principalmente en la industria química; sin embargo, también se puede utilizar como combustible y se produce principalmente de recursos fósiles y renovables, incluidos el reformado con vapor, la pirólisis y la gasificación de biomasa (Megía et al., 2021). Además, el H_2 puede generarse a partir del agua mediante el proceso de electrólisis; al ser un prometedor sustituto de los combustibles fósiles, el H_2 se ha convertido en una energía limpia y renovable (Wang et al., 2021). La electrólisis es un proceso electroquímico de división del H_2O que produce O_2 e H_2 (Bhattacharyya et al., 2017); no obstante, producir H_2 por este método en los llamados electrolizadores (Esposito, 2017) conlleva diferentes procesos luego de su obtención, como el almacenamiento (Rivard et al., 2019). Aunque el H_2 es una energía sin emisiones de carbono en el punto de uso final, depende de la ruta de producción y de la energía utilizada para producirlo (Dawood et al., 2020). En este sentido, la producción de H_2 a partir de fuentes de energía renovables se denomina “hidrógeno verde” (Karayel et al., 2022), por lo que la electrólisis es una

buena opción para aprovechar al máximo los excedentes de energía renovable (Kojima et al., 2023) y tiene un importante impacto económico (Maggio et al., 2019); a pesar de ello, un problema en la producción de H_2 con tecnologías renovables son las condiciones climáticas (Praveenkumar et al., 2022). Recientemente se han realizado estudios que especifican que es posible operar estas tecnologías convencionales de producción de energía con una mezcla de gas natural e H_2 como combustible (Moelling et al., 2022) y biocombustibles con H_2 (Öberg et al., 2022), destacando su competitividad como parte de la transición desde el actual sistema eléctrico a los sistemas eléctricos del futuro. En este sentido, es bien sabido que el H_2 es un vector energético viable para aplicaciones como el suministro de energía y exportaciones de energía química a pequeña y gran escala, respectivamente (Abdin et al., 2020); por lo cual, se han realizado diferentes investigaciones de la producción de H_2 a través de métodos convencionales (Martín y Grossmann, 2011; Bartels et al., 2010), como hidrógeno verde (Prieto et al., 2023), a partir de compuestos como el glicerol (Martín y Grossmann, 2014) y diseño de cadenas de suministro (Li et al., 2019).

Por otro lado, el almacenamiento de energía es importante para los sistemas eléctricos, permitiendo la nivelación de carga y la reducción de picos, oscilaciones de energía y la mejora de la calidad y confiabilidad de la energía (Koochi-Fayegh y Rosen, 2020), esto se logra almacenando el exceso o energía no utilizada y suministrándola a la red cuando sea necesario (Tan et al., 2021). Entre varias tecnologías de baterías, las llamadas de iones de litio (Li-ion) y redox de vanadio (BRV) para el almacenamiento de energía renovable (solar y eólica) exhiben una alta eficiencia energética, un largo ciclo de vida y una densidad energética relativamente alta (Chen et al., 2020; da Silva Lima et al., 2021). Asimismo, es ampliamente conocido que las tecnologías convencionales generan grandes cantidades de emisiones como consecuencia de la quema de combustibles fósiles (Razmjoo et al., 2021), a diferencia de las tecnologías renovables que ofrecen una opción amigable para el medio ambiente, beneficiando la mitigación de emisiones de CO_2 (Namahoro et al., 2021), un buen ejemplo son los paneles fotovoltaicos que ayudan en la mitigación del cambio climático (Praveenkumar et al., 2023a; Praveenkumar et al., 2023b). Debido a lo anterior, recientemente se ha considerado un impuesto ambiental (impuesto al carbono) sobre las emisiones de carbono emitidas en los diferentes procesos para mitigar el

cambio climático (Ding et al., 2019); este tipo de impuesto depende de las políticas gubernamentales de cada país (Yuyin y Jinxi, 2018).

Es importante considerar los aspectos anteriores para diseñar redes de producción de energía adecuadas, buscando soluciones de compensación costo-beneficio, lo que ha resultado en considerar factores como la selección y capacidad de los equipos (tecnologías de generación (Serrano-Arévalo et al., 2020), almacenamiento de energía (Liu y Du et al., 2020), electrolizadores (Rezaei et al., 2022), entre otros), así como aspectos económicos y ambientales asociados. Dentro de los sistemas energéticos se han utilizado herramientas de decisión como técnicas de optimización multi-objetivo con restricciones operacionales (Tovar-Facio et al., 2021), métodos de optimización mono-objetivo (Al-Shahri et al., 2021), formulación de modelos de programación estocástica y determinista (Hu y Ryan, 2019), algoritmos de diseño y optimización basados en programación lineal entera mixta (MILP) (Moretti et al., 2019) y métodos de optimización progresiva uniforme con estrategias de aproximación sucesiva (Feng et al., 2018).

En los últimos años la economía circular (EC) ha cobrado importancia como un modelo que promueve el uso responsable de los recursos; el concepto de EC contrasta con la economía lineal (tomar, hacer, usar, desechar) que tiene como principio ralentizar, cerrar y estrechar los bucles de recursos a través de la reutilización y el reciclaje (Bocken et al., 2016), este concepto alcanzado gran relevancia a tal punto de convertirse en clave para políticas industriales, ambientales y económicas para países como China, África, la Unión Europea y los Estados Unidos, así como para una lista creciente de corporaciones y gobiernos locales (Corvellec et al., 2022). Las expectativas de la EC plantean que debe existir un círculo perfecto de flujos lentos de materiales, impulsar un cambio de consumidor a usuario y el crecimiento a través de la circularidad y el desacoplamiento (Lazarevic y Valve, 2017). La EC es un concepto que tiene distintas vertientes, que van desde los aspectos económicos y ambientales como la gestión de residuos y recursos, hasta los aspectos sociales de la sostenibilidad como parte del concepto de EC en donde se ha identificado que elementos como la educación, la participación y el apoyo legislativo surgen como puntos de apoyo para la transformación hacia una EC sostenible (Mies y Gold, 2021). En este sentido, la implementación del concepto de EC ha resultado en la creación

de métricas que pretender medir el grado de circularidad; por ejemplo, Di Maio y Rem (2015) desarrollaron el Índice de Economía Circular (CEI, por sus siglas en inglés: Circular Economy Index), el cual se basa en la consideración de reciclaje como una relación entre el material que es producido y el que es reciclado, Smol et al., (2017) han propuesto indicadores que evalúan el nivel de eco-innovación de la EC a nivel regional, Ellen MacArthur Foundation (2015) formuló el Indicador de Circularidad del Material (MCI, por sus siglas en inglés: Material Circularity Indicator) que tiene como objetivo determinar el grado en que el flujo lineal ha sido restaurado, Franklin-Johnson et al., (2016) propusieron el indicador de longevidad que cuantifica la retención de materiales de acuerdo al tiempo en que un recurso es utilizado.

Las metodologías anteriores han sido utilizadas para el estudio del uso de energía renovable y vectores energéticos como el H_2 . Sin embargo, la obtención de información detallada del proceso es una incógnita, por lo que se requiere de simulaciones computacionales para estudiar características del proceso, dimensionamiento de unidades, interacciones de unidades existentes y candidatas, pero sobre todo es indispensable realizar un estudio profundo en el que además del uso de energía renovable se involucre la EC, que busca ir más allá de la contabilización y reducción de emisiones y energía producida, beneficiando aspectos económicos y ambientales. Considerando lo antes mencionado y recalando que las estrategias de EC se han estudiado individualmente y no en conjunto con enfoques de optimización en el sector energético, es necesario minimizar los requerimientos materiales de la infraestructura requerida en la planificación del sector para contribuir con iniciativas de EC. Además, los sistemas energéticos han sido mayormente planificados durante la fase operativa que durante la fase de diseño y, en general, la formalización de metodologías de diseño para minimizar impactos ambientales en la fase de diseño es todavía un tema pendiente, es por esta razón que este proyecto propone incorporar indicadores de EC que cuantifiquen requerimientos materiales en la infraestructura utilizada y garanticen la producción de energía eléctrica satisfaciendo una demanda energética requerida y la producción de H_2 , un atributo relevante (aún escasamente abordado en la literatura) de los indicadores propuestos es que no solo se centra en extender el ciclo de los materiales, si no, utilizar solo los materiales necesarios cumpliendo con el funcionamiento del sistema, disminuyendo el agotamiento de dichos materiales. Considerando lo anterior, es importante resaltar la oportunidad de estudio en el concepto y las aplicaciones del

desarrollo sostenible y la descarbonización del sector energético, especialmente en relación con uno de los vectores energéticos más importantes en la actualidad: el H_2 .

1.3. Justificación

En la actualidad, la demanda de combustibles fósiles continúa en aumento, ya que se emplean tanto en procesos de combustión para la generación de energía eléctrica como en procesos industriales convencionales que los utilizan como materia prima, lo que conlleva la emisión de contaminantes. La transición hacia un esquema energético sustentable se vuelve más evidente e importante; la implementación de este esquema considera las energías renovables, representando una oportunidad para sustituir una parte de los métodos convencionales que utilizan combustibles fósiles, obteniendo vectores energéticos y contribuyendo a la descarbonización del sector energético. Las energías renovables, aunque son una fuente prometedora de energía limpia, enfrentan desafíos significativos relacionados con su almacenamiento y la intermitencia de su generación. Esto dificulta su aprovechamiento total y constante; en este sentido, se pueden aprovechar para obtener productos de alto valor agregado y almacenar dicha energía en vectores energéticos. Los vectores energéticos como el H_2 deben ser procesados; sin embargo, su implementación requiere el estudio de aspectos importantes, incluida la selección y utilización máxima de energía renovable, rutas de procesamiento, infraestructura, costos de dicho proceso, así como muchos otros criterios económicos y de sostenibilidad. Más allá de la implementación de energía renovable, se representa una oportunidad para la participación de vectores energéticos dentro del mercado, no solo energético sino de transformación de productos químicos, trayendo consigo beneficios económicos, ambientales y de EC.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo de optimización determinista enfocado a la descarbonización del sector energético que permita la planificación de un sistema sostenible para la producción de H_2 , integrando de manera equilibrada factores económicos y ambientales, y utilizando únicamente los materiales estrictamente necesarios, de acuerdo con los principios de la EC.

1.4.2. Objetivos particulares

- Establecer casos de estudio, particularmente en el país de México, enfocándose en regiones con disponibilidad de energía renovable.
- Desarrollar un modelo matemático que permita obtener la configuración óptima en el proceso de producción de H_2 a través de electrólisis.
- Establecer indicadores que permitan cuantificar los materiales utilizados en la infraestructura y su impacto en el agotamiento de recursos no renovables, con base en los principios de la EC.
- Integrar aspectos económicos y ambientales con el fin de garantizar la máxima producción y sostenibilidad en el proceso.

1.5. Hipótesis

El uso de la programación matemática, junto con la planificación propuesta, permitiría identificar el diseño óptimo de un sistema energético formulado bajo los principios de la EC, priorizando el uso eficiente de recursos y la minimización del agotamiento de recursos no renovables. La producción de hidrógeno verde a partir de fuentes de energía renovable se incorpora como un caso de aplicación que contribuye a la descarbonización del sector energético, integrando de manera equilibrada criterios económicos y ambientales.

Capítulo II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

En este capítulo se presentan y discuten los conceptos fundamentales que enmarcan el presente trabajo de investigación, con el propósito de proporcionar la base teórica necesaria para la comprensión de los capítulos posteriores. Se discuten las distintas etapas en el proceso de obtención de energía eléctrica y el concepto de EC, lo que nos permitirá construir un modelo que se describe en los siguientes capítulos.

2.2. Generación de energía eléctrica

De manera general, la energía se clasifica en renovable y no renovable (o convencional), esta última tiene su principal característica en encontrarse limitada en la naturaleza, basada principalmente en combustibles fósiles (p. ej., gas natural, carbón, combustóleo, entre otros) y, por lo que habitualmente es contaminante al desprender Gases de Efecto Invernadero (GEI), además en ciertas regiones la disponibilidad de estos recursos se reduce debido a la infraestructura requerida para su obtención y en otros casos por el agotamiento causado en la explotación incontrolada de dicha fuente, por lo cual estas restricciones pueden impedir la operación plena de centrales convencionales en determinadas zonas, al no cumplirse los requerimientos de abastecimiento de combustibles fósiles, lo que deriva en una incapacidad para satisfacer la demanda energética requerida. Las energías renovables son aquellas que toman como fuente recursos naturales inagotables o que tienen una rápida regeneración, contaminando de menor manera, lo que las hace atractivas; estas energías se clasifican en variables (p. ej., solar y eólica) y no variables (p. ej., hidroeléctrica) según la disponibilidad del recurso natural (Serrano-Arévalo et al., 2023). Por otro lado, la energía limpia comprende fuentes de generación con bajas emisiones, independientemente de su carácter renovable (Legal Information Institute, s.f.).

Una vez completada la generación de energía eléctrica, una de las etapas posteriores que habitualmente se realizan es su almacenamiento, el cual se lleva a cabo cuando existe un

excedente energético y permite su suministro a la red cuando es requerido. Este tipo de sistemas contribuye a la nivelación de la carga, la reducción de picos y oscilaciones energéticas, así como a la mejora de la calidad y confiabilidad del suministro eléctrico (Koochi-Fayegh y Rosen, 2020). Para este propósito, se emplean comúnmente baterías, debido a su alta eficiencia energética, larga vida útil y densidad de energía relativamente elevada (Chen et al., 2020; da Silva Lima et al., 2021). No obstante, una alternativa viable para el almacenamiento de energía consiste en el uso de los denominados vectores energéticos, los cuales pueden producirse a partir de fuentes energéticas tanto renovables como convencionales. En este contexto, la energía renovable resulta una candidata particularmente adecuada para la generación de vectores energéticos, debido a la frecuente existencia de excedentes en su producción, en donde un claro ejemplo es el uso de dicha energía como fuente de producción de H_2 a través de electrólisis y posteriormente utilizar este químico como biocombustible u otro tipo de producto de valor agregado (ver **Figura 2.1**), cabe mencionar que la energía renovable puede ser utilizada en la producción de otro tipo de vectores energéticos.

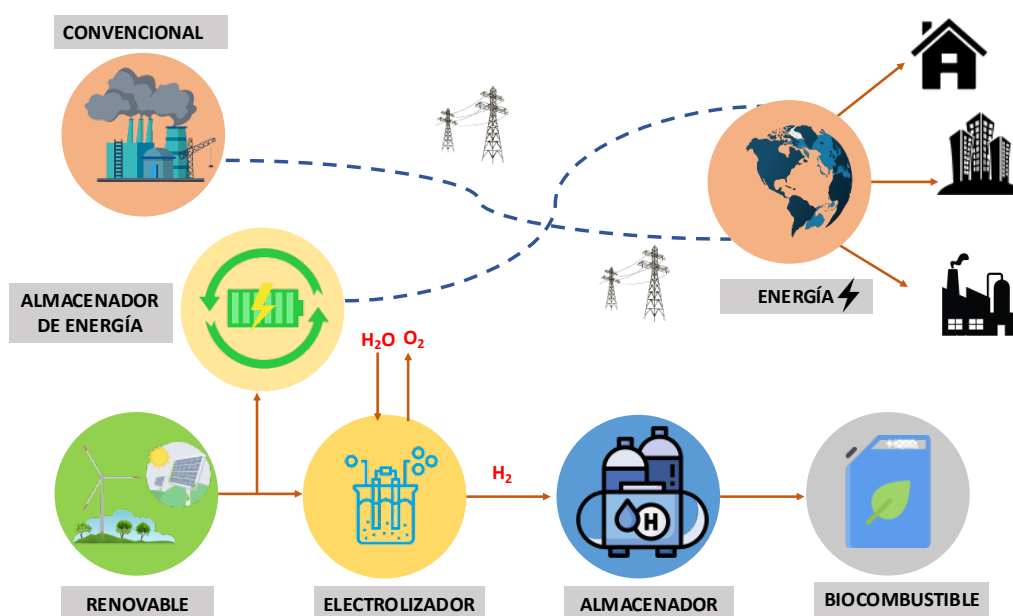


Figura 2. 1. Uso de energía renovable en la producción de H_2 (tomada de Serrano-Arévalo et al., 2023).

2.3. Indicadores ambientales en el sector energético

Los indicadores ambientales son herramientas clave para evaluar el desempeño del sector energético desde una perspectiva de sostenibilidad, ya que permiten cuantificar los impactos asociados a la estructura energética (Afgan et al., 2000). Entre los aspectos más comúnmente evaluados se encuentran las emisiones de GEI, el uso de agua, los requisitos de tierra, el consumo de recursos naturales y la generación de residuos, los cuales proporcionan información relevante para comparar tecnologías y escenarios energéticos (Evans et al., 2009). En la planificación energética, la incorporación de indicadores ambientales resulta fundamental para analizar los compromisos entre el desempeño económico y la mitigación de impactos ambientales, especialmente en contextos de transición hacia sistemas basados en fuentes de energía renovable. Asimismo, bajo el enfoque de la EC, estos indicadores amplían su alcance al considerar el uso eficiente de materiales y la reducción del agotamiento de recursos no renovables, contribuyendo al diseño de sistemas energéticos más sostenibles a lo largo de su ciclo de vida.

2.4. Economía circular

La EC es un concepto económico que se encuentra interrelacionado con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, reduciendo al mínimo los residuos, además, es un concepto general para cerrar ciclos de materiales hacia un mejor desempeño ambiental (Castro et al., 2022). Esto se puede lograr a través de diseño, mantenimiento, reutilización, reacondicionamiento y reciclaje (Geissdoerfer et al., 2017).

A pesar de que diferentes organizaciones impulsan la transición hacia una EC se han identificado desafíos que pueden variar según la empresa y la situación específica; sin embargo, se sugiere primero identificarlos y luego seleccionar soluciones y acciones correctivas contra problemas recurrentes en las iniciativas de EC, de manera que se minimicen los costos de implementación y se maximice la efectividad (Bressanelli et al., 2019), a consecuencia de esto el diseño y la planificación de cadenas de suministro es importante para la implementación de iniciativas de EC, también es importante evaluar el desempeño de las cadenas de suministro en todo el aspecto de dimensiones de sostenibilidad (MahmoumGonbadi et al., 2021; Sudusinghe y Seuring, 2022), es por esta razón que la EC ha sido aplicada a una gama amplia de ámbitos como

en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica (Osorio et al., 2021), gestión de residuos sólidos (Velvizhi et al., 2020; Giannakitsidou et al., 2020), agua urbana (Kakwani y Kalbar, 2020), equipos eléctricos y electrónicos (Bressanelli et al., 2021), industria siderúrgica (Roychand et al., 2020), sector agrícola (Barros et al., 2020), entre otras, lo que ha mostrado una amplia aplicación a distintas problemáticas actuales. Sin embargo, el sector energético no ha sido explotado dentro del campo de la investigación referente a la iniciativas de EC, mostrando gran preocupación en este ámbito ya que es bien sabido que las tecnologías convencionales y renovables utilizadas en la producción de energía eléctrica han sido una buena alternativa debido a sus altas eficiencias, capacidades de producción y rentabilidad (Reddy et al., 2015; Dhakouani et al., 2019) para satisfacer demandas energéticas requeridas (Serrano-Arévalo et al., 2020), no obstante, algunas de las limitaciones son las inversiones económicas (Islam et al., 2022) y la disponibilidad de infraestructura (Tavakkoli et al., 2021), sin dejar a un lado las consecuencias ambientales derivadas del uso de materiales en dicha infraestructura asociadas a la expansión continua de la infraestructura energética que implica emisiones futuras de CO₂ asociadas a la vida útil y horarios operativos, que comprometen los esfuerzos para restringir el incremento de la temperatura global a 1.5 °C (Tong et al., 2019) (ver **Figura 2.2**).

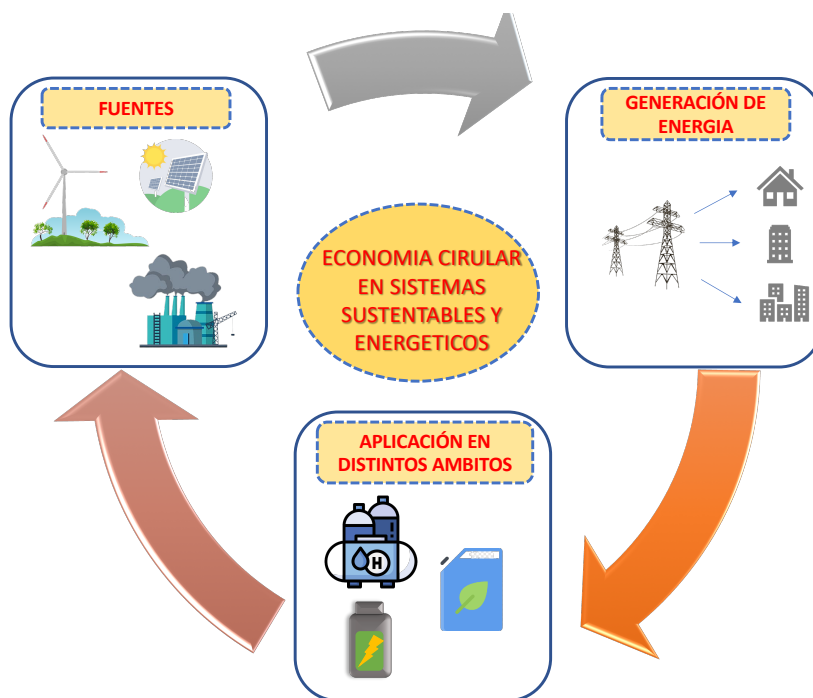


Figura 2. 2. Iniciativas de economía circular en distintas aplicaciones.

2.5. Optimización

La optimización tiene como objetivo evaluar y determinar la alternativa más adecuada entre un conjunto de soluciones posibles. La aplicación de distintos métodos de optimización permite mejorar el desempeño de un sistema o proceso, así como facilitar el control y ajuste de los parámetros que lo describen. Mediante estas técnicas es posible abordar una extensa gama de problemas relacionados con la construcción, el diseño, el análisis de plantas y la operación, además de otros procesos industriales. En este contexto, la optimización constituye una de las herramientas cuantitativas más relevantes para apoyar la toma de decisiones en el ámbito industrial. Su enfoque se basa en la selección de la mejor opción dentro de un sistema global, utilizando métodos matemáticos eficientes. El uso de computadoras y software especializado ha hecho viables y económicamente accesibles los cálculos requeridos; no obstante, para obtener resultados útiles y aproximados a la realidad es indispensable realizar un análisis crítico del proceso o diseño, definir claramente los objetivos a alcanzar y aprovechar la experiencia previa. De manera general, la optimización consiste en identificar los valores óptimos de una función objetivo dentro de un dominio previamente establecido, considerando distintos tipos de funciones objetivo y restricciones (Labra-Marín et al., 2018).

Capítulo III

3. METODOLOGÍA

3.1. Introducción

A lo largo de este capítulo se plantea el problema abordado y se describe el procedimiento mediante el cual se analiza la producción de energía eléctrica e hidrógeno verde. Asimismo, se presenta la formulación de optimización propuesta, la cual caracteriza las técnicas empleadas. En la cuarta sección se desarrollan las relaciones matemáticas que modelan la superestructura propuesta, incorporando además aspectos económicos, ambientales y de EC.

3.2. Planteamiento del problema

Con el fin de aprovechar los excedentes de energía renovable mediante vectores energéticos, este trabajo busca determinar y evaluar el arreglo óptimo, desde un enfoque económico y ambiental, para la producción de hidrógeno verde. El objetivo es maximizar el aprovechamiento de la energía disponible y sustituir parcialmente procesos convencionales basados en combustibles fósiles. Asimismo, se propone un enfoque integrador que relacione la conversión energética y la planificación del proceso, promoviendo un uso eficiente de la infraestructura disponible, la reducción de materiales no renovables y la disminución de emisiones ambientales mediante el almacenamiento de energía renovable en forma de H_2 . Se plantea un sistema operacional, incorporando técnicas de optimización mono-objetivo y multi-objetivo, además, el problema abordado en este trabajo, tiene distintas consideraciones que se muestran a continuación:

- Un conjunto de tecnologías ($j = 1, 2, \dots, J$) generan energía de acuerdo a la demanda energética en un periodo de tiempo específico ($t = 1, 2, \dots, T$).
- La producción de energía satisface demandas energéticas en regiones geográficas ($r = 1, 2, \dots, R$) que se encuentran interconectadas con la finalidad de compartir energía entre ellas, además, la energía se transmite entre regiones por medio de líneas de transmisión.
- Las tecnologías generadoras de energía se clasifican de acuerdo a la operación de estas: tecnologías convencionales ($jt = 1, 2, \dots, J$) y renovables ($jrt = 1, 2, \dots, J$).

- Las tecnologías convencionales operan con distintos combustibles fósiles que dependen de los requerimientos de la infraestructura, por lo que se clasifican en las tecnologías que utilizan gas natural ($jg = 1, 2, \dots J$) y combustóleo ($jc = 1, 2, \dots J$).
- Las tecnologías renovables se clasifican en tecnología renovables variables ($jr = 1, 2, \dots J$) que se encuentran limitadas por la disponibilidad de recursos naturales, así como la variabilidad que estos pueden tener de acuerdo a las condiciones climáticas dadas y en tecnologías renovables no variables ($jrh = 1, 2, \dots J$) que son aquellas que no se encuentran limitadas por recursos naturales.
- El problema energético abordado también considera la producción de vectores energéticos como lo es el H_2 , especialmente el llamado hidrógeno verde que proviene de tecnologías renovables; para producir el H_2 se requiere de equipos denominados electrolizadores ($h = 1, 2, \dots H$).
- El H_2 producido puede ser utilizado como combustible en tecnologías generadoras de energía que lo requieran; sin embargo, cuando este no es requerido en un periodo de tiempo específico, puede ser almacenado en equipos almacenadores de H_2 ($g = 1, 2, \dots G$) y posteriormente ser mezclado con gas natural para ser utilizado como combustible en tecnologías.
- La energía no utilizada, proveniente de tecnologías renovables en un periodo de tiempo específico, es almacenada en baterías ($i = 1, 2, \dots I$) para posteriormente ser utilizada cuando sea demandada.
- Indicadores de economía circular son implementados, con la finalidad de cuantificar requerimientos materiales en la infraestructura utilizada y autoabastecimiento energético en el sistema.
- Aspectos económicos y ambientales son considerados de manera simultánea en la planificación; además, son factores para los tomadores de decisiones.
- La cuantificación de requerimientos materiales (*Materialreq*) se encuentra asociada a la infraestructura utilizada, normalizada de acuerdo al agotamiento de los recursos naturales no renovables.
- Los indicadores de economía circular son métricas de los recursos no renovables utilizados (*DMA*), energía producida (*DMR*) y consumo de energía (*AE*) por región ($r = 1, 2, \dots R$).

Las consideraciones anteriores se muestran en la siguiente superestructura (ver **Figura 3.1**).

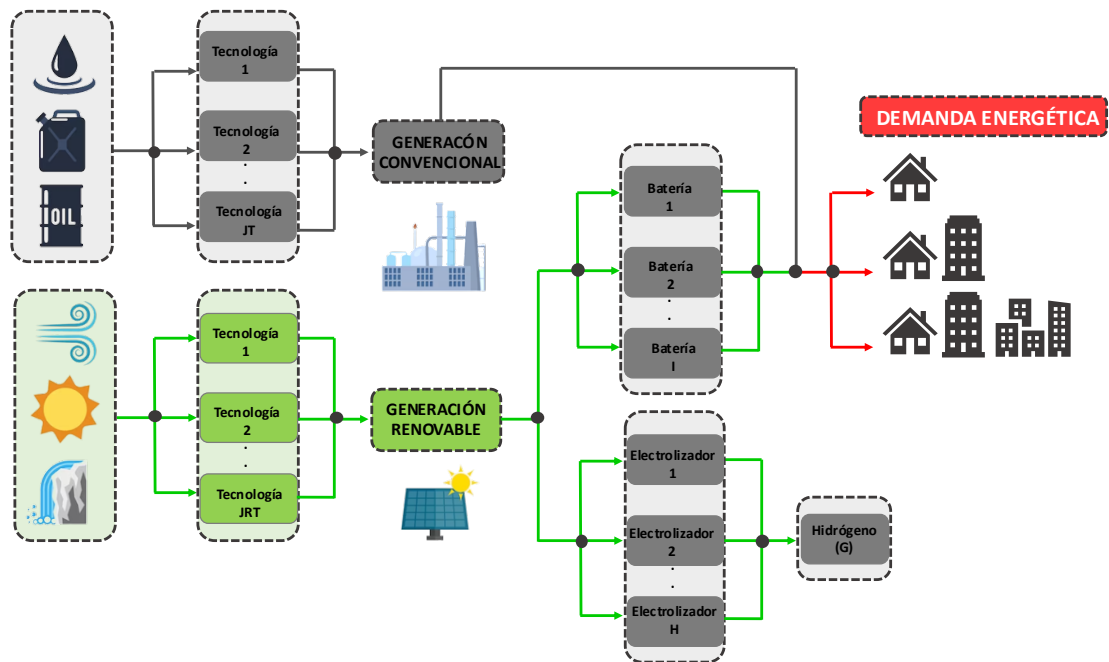


Figura 3. 1. Representación esquemática de la superestructura propuesta para la generación de energía eléctrica e H_2 (tomada de Serrano-Arévalo et al., 2024a).

El problema consiste en determinar la configuración óptima en el sistema energético anterior, esta configuración será capaz de cuantificar la energía producida por las tecnologías generadoras y su transmisión a regiones, especificando los equipos utilizados y sus dimensiones. Sin embargo, para llevar a cabo lo anterior se presenta la implementación de cuantificadores económicos y ambientales que son optimizados simultáneamente. Además, el problema destaca el desarrollo de indicadores de economía circular dentro del sector energético, minimizando el uso de materiales y energía. Los costos de la planificación se encuentran asociados a los costos de capital para la adquisición de tecnologías renovables productoras de energía, equipos de almacenamiento de energía e H_2 y electrolizadores, así como los costos asociados a la operación de dichos equipos. La implementación de indicadores de EC resulta un recurso valioso para establecer métricas rigurosas sobre los requerimientos de recursos no renovables utilizados durante la fase de instalación. Estos cuantificadores son capaces de ofrecer distintas soluciones a los tomadores de decisiones. En este contexto, los requerimientos materiales de la infraestructura del proceso no han sido estudiados como una de las vertientes de la EC dentro del sector energético, es por ello que este trabajo pretende establecer la disponibilidad de métricas dentro de

la EC que van más allá de la reducción de emisiones y energía producida con tecnologías renovables. Finalmente, el costo asociado a la planificación, las emisiones generadas en la producción de energía y los indicadores de EC son empleados como funciones objetivo que son definidas por medio de la implementación de optimización multi-objetivo, generando beneficios económicos y ambientales.

3.3. Formulación de optimización propuesta

La técnica de programación compromiso ha sido aplicada con la finalidad de realizar una optimización multi-objetivo. Primeramente, se propone un modelo de optimización para seleccionar el conjunto de equipos generadores de energía necesarios para satisfacer la demanda requerida en un modelo operacional de generación de energía eléctrica. Métricas de EC son incorporadas como consecuencia de la cuantificación de requerimientos materiales en la infraestructura utilizada en el sistema (tecnologías convencionales y renovables; baterías, electrolizadores y almacenadores de H_2), esta cuantificación es normalizada por medio del Potencial de Agotamiento Abiótico (ADP, por sus siglas en inglés: Abiotic Depletion Potential) como un comparativo del agotamiento de los recursos no renovables. Por otra parte, la planificación es capaz de producir vectores energéticos como el H_2 para ser utilizado como combustible. Adicionalmente, el modelo matemático incluye las ecuaciones necesarias que describen la planificación propuesta, considerando los requerimientos materiales de la infraestructura requerida, así como la cuantificación de indicadores de EC, aspectos económicos y ambientales (ver **Figura 3.2**).

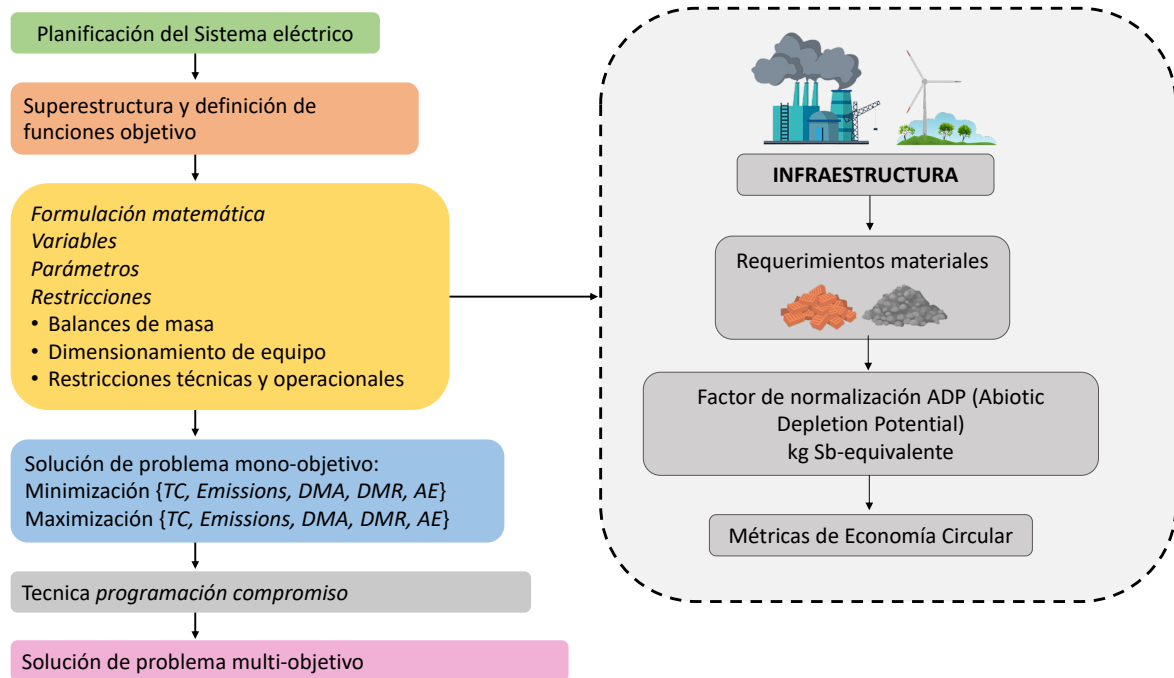


Figura 3. 2. Metodología propuesta para la evaluación de aspectos económicos, ambientales e indicadores de EC (tomada de Serrano-Arévalo et al., 2024a).

La técnica de programación compromiso es una rama de la optimización multi-objetivo que da como resultado distintas decisiones multicriterio, en donde las diferentes funciones objetivo (normalmente conflictivas) tienen pesos relativos con la finalidad de dar distintas medidas de importancia, además la técnica de solución de compromiso minimiza la distancia a la solución ideal (Zelany, 1974). Con el propósito de mostrar la aplicación de la técnica anterior, supongamos que distintas funciones objetivo se pretenden optimizar en conjunto, en el eje X se encuentra la función objetivo 1 “x” y en el eje Y la función objetivo 2 “y”, las cuales son funciones que en conjunto tendrán una solución óptima que beneficie a ambas y para lograr esta meta la técnica aplica pesos relativos para la función objetivo 1 (w_1) y para la función objetivo 2 (w_2) que corresponde al nivel de importancia dado para cada una de ellas, sin embargo, para aplicar la metodología se requieren de puntos máximos y mínimos para definir el intervalo en el que se encontrara la solución óptima. Para representar lo anterior se requieren valores ideales (id) y no ideales (nid) de cada una de las funciones, el primero de ellos se encuentra al minimizar las funciones objetivo 1 y 2 de forma separada con optimización mono-objetivo y el segundo al maximizar las funciones de la misma manera. Al interceptar id de la función objetivo 1 con la función objetivo 2 resulta el llamado “punto utópico” en donde se tiene la mejor de las soluciones

(considerando que se espera el menor valor posible en cada una de las funciones, por ejemplo, en el aspecto económico el menor costo asociado al proceso y en el aspecto ambiental el menor impacto). Adicionalmente, la solución no deseada se encuentra en el “punto nadir”, es en donde coincide el valor *nid* de la función objetivo 1 con la función objetivo 2. Con la técnica aplicada es posible conocer los valores óptimos (*op*) de las funciones objetivo al incorporar pesos relativos, los cuales se encuentran como puntos intermedios deseados. Con lo que, a mayor cercanía del valor óptimo con el punto utópico, mayor índice de satisfacción.

El propósito es encontrar una solución en común que beneficie a las funciones objetivo participantes por lo que matemáticamente la solución óptima que resulta de la técnica de programación compromiso es descrita por las ecuaciones 3.1 y 3.2, en donde para la función objetivo 1, los valores x_{id} , x_{nid} y x_{op} representan el valor ideal, no ideal y óptimo, respectivamente.

$$\frac{x_{op} - x_{id}}{x_{nid} - x_{id}} \cdot w_1 \leq \gamma \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Análogamente para la función objetivo 2 en donde y_{id} , y_{nid} y y_{op} representan el valor ideal, no ideal y óptimo, respectivamente.

$$\frac{y_{op} - y_{id}}{y_{nid} - y_{id}} \cdot w_2 \leq \gamma \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Además, para encontrar el punto óptimo de las funciones objetivo y resolverlas en conjunto como multi-objetivo, es necesario incorporar una variable en común, por lo que γ representa la variable a minimizar. Adicionalmente, x_{op} y y_{op} son variables que serán encontradas con la técnica de programación compromiso, los valores x_{id} , x_{nid} , y_{id} y y_{nid} son parámetros que se encuentran al minimizar las funciones de manera mono-objetivo, mientras w_1 y w_2 son parámetros que dependen de la importancia que se desee tener para cada una de las funciones y que usualmente tienen un valor entre 0 y 1, en donde 1 corresponde a la mayor importancia. Es importante destacar que la solución también busca minimizar Δx y Δy con la finalidad de aproximar la solución óptima lo mayormente posible al punto utópico. La técnica anterior puede ser aplicada a n funciones objetivo, sin embargo, para fines prácticos la técnica fue descrita para las funciones objetivo 1 y 2 en dos dimensiones.

3.4. Formulación de modelo matemático

El modelo matemático propuesto consiste en un conjunto de relaciones matemáticas que describen las consideraciones para lograr los objetivos de la metodología antes propuesta. Además, la formulación del modelo de optimización es desarrollada en base a la superestructura presentada en la **Figura 3.1**. El modelo pretende cuantificar la energía producida por el sistema, el equilibrio demanda-producción, especificando las dimensiones de los equipos requeridos durante la producción de energía e H₂ y considerando los costos asociados a su operación. También considera aspectos ambientales como lo son la cantidad de emisiones de CO_{2eq} emitidas a la atmósfera durante la operación de las tecnologías generadoras de energía, en este sentido, es de gran relevancia mencionar que el modelo incluye métricas relacionadas a la EC, buscando resaltar la importancia de los recursos materiales requeridos durante el proceso. El modelo matemático se encuentra constituido de variables y parámetros como se describe a continuación: balances de materia, restricciones de operación e instalación de equipos nuevos, limitaciones de demanda en cada región, combustible utilizado en las distintas tecnologías, eficiencia, tiempo de operación, factores de emisión, costos operativos, costos de capital, transmisión de energía, y finalmente función objetivo a optimizar, además los índices, variables y parámetros utilizados en el modelo han sido definidos en la sección de Nomenclatura.

3.4.1. Demanda de electricidad en cada región de transmisión

La demanda de electricidad (*EDEM*) en cada región (*r*) e intervalo de tiempo (*t*) se puede satisfacer con la generación local (*eprodem*) de las tecnologías disponibles (*j*), la energía producida y transmitida desde una región diferente (*r'*) y la energía que se descarga de los sistemas de almacenamiento de energía. Cuando se utiliza energía externa a la región *r*, es necesario tomar en cuenta la eficiencia de transmisión (η^{trans}) para considerar las pérdidas por transporte de electricidad. Además, se incluye un término de la demanda no suministrada (*umdem*) para completar el balance y evitar escenarios imposibles. Sin embargo, se espera que la demanda siempre se satisfaga, por lo que la demanda no suministrada está penalizada en la función objetivo.

$$EDEM_{r,t} = umdem_{r,t} + \sum_j eprodem_{r,j,t} + \sum_{r' \neq r} \sum_j etrans_{r',r,j,t} (\eta^{trans}) + \sum_i edes_{r,i,t} \quad \forall r \in R, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.3})$$

3.4.2. Producción de energía convencional

La electricidad generada ($ep_{r,jt,t}$) por cada tecnología convencional (jt) de la región (r) se obtiene sumando la energía que se usa para satisfacer la demanda local más la energía transmitida desde la región r hasta la región r' correspondiente a una región diferente con infraestructura de transmisión disponible.

$$ep_{r,jt,t} = eprodem_{r,jt,t} + \sum_{r' \neq r} etrans_{r,r',jt,t} \quad \forall r \in R, \forall jt \in J, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.4})$$

3.4.3. Cantidad de combustible consumido por las tecnologías convencionales

La cantidad de combustible necesario en las tecnologías convencionales que utilizan gas natural (kg), se cuantifica sumando la masa de gas natural ($mgas$) y la masa del H_2 usado en las centrales de potencia ($m^{H_2,burn}$) multiplicada respectivamente por el poder calorífico de cada uno de ellos ($LHVG$) y ($LHVH$) y el cociente de la eficiencia térmica de los combustibles a electricidad ($\eta_{jg}^{convgas}$) y ($\eta_{jg}^{convH_2}$).

$$ep_{r,jg,t} = \frac{mgas_{r,jg,t} (LHVG)}{(\eta_{jg}^{convgas})} + \frac{\sum_h m_{r,h,jg,t}^{H_2,burn} (LHVH)}{(\eta_{jg}^{convH_2})} \quad \forall r \in R, \forall jg \in J, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Algunas de las tecnologías convencionales (jt) funcionan con otro tipo de combustibles (p. ej., combustóleo), para este tipo de tecnologías (jc) se cuantifica la cantidad de combustible de la siguiente manera:

$$ep_{r,jc,t} = \frac{mcom_{r,jc,t} (LHVC)}{(\eta_{jc}^{convotr})} \quad \forall r \in R, \forall jc \in J, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.6})$$

En donde $mcom$ es la masa de otros combustibles.

3.4.4. Producción de energía renovable

La electricidad generada por las tecnologías renovables de cada región (ep) se obtiene sumando la energía usada para cargar los sistemas de almacenamiento de energía ($ecar$), la energía renovable transmitida a otras regiones ($etrans$), la energía no aprovechada (cu), denominada “curtailment” y la energía renovable usada por los electrolizadores en la generación de H_2 ($eelec$). Por otro lado, las tecnologías renovables, jrt , se clasifican en tecnologías variables

(jr) que están limitadas por la disponibilidad del recurso y la variabilidad por las condiciones climáticas (p. ej., solar y eólico) y tecnologías no variables (jr_h) que no se encuentran limitadas por los recursos (p. ej., hidroeléctrica). Las siguientes ecuaciones relacionan lo anterior.

$$ep_{r,jr,t} = eprod_{r,jr,t} + \sum_i ecar_{r,jr,i,t} + \sum_h eelec_{r,jr,t,h} + \sum_{r' \neq r} etrans_{r,r',jr,t} + cu_{r,jr,t} \quad \forall r \in R, \forall jr \in J, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$ep_{r,jr_h,t} = eprod_{r,jr_h,t} + \sum_i ecar_{r,jr_h,i,t} + \sum_h eelec_{r,jr_h,t,h} + \sum_{r' \neq r} etrans_{r,r',jr_h,t} + cu_{r,jr_h,t} \quad \forall r \in R, \forall jr_h \in J, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.8})$$

3.4.5. Energía renovable no aprovechada total

La energía renovable que no puede ser aprovechada por el sistema debido a limitaciones técnicas en la infraestructura se toma en cuenta para ser penalizada en la función objetivo, ya que lo que se busca es minimizar su valor.

$$cuT = \sum_r \sum_{jrt} \sum_t cu_{r,jrt,t} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

3.4.6. Restricciones de operación de las plantas de energía convencional

Incremento en la generación de electricidad

Considera la capacidad de producción $CAPROD$ de las distintas tecnologías convencionales jt , así como la fracción de la capacidad instalada que se puede incrementar por hora $RUMAX$.

$$ep_{r,jt,t} - ep_{r,jt,t-1} \leq RUMAX_{jt} (CAPROD_{r,jt,t}), \quad \forall r \in R, \forall jt \in J, \forall t > 1 \in T \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Decremento en la generación de electricidad

Considera la capacidad de producción $CAPROD$ de las distintas tecnologías convencionales (jt), así como la fracción de la capacidad instalada que se puede disminuir por hora $RDMAX$.

$$ep_{r,jt,t-1} - ep_{r,jt,t} \leq RDMAX_{jt} (CAPROD_{r,jt,t}), \quad \forall r \in R, \forall jt \in J, \forall t > 1 \in T \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Generación máxima y mínima de las tecnologías

Las siguientes restricciones son usadas con la finalidad de que las plantas no se apaguen y se encuentran asociadas a la capacidad de producción $CAPROD$, en donde se especifican los límites máximos y mínimos de generación.

$$ep_{r,jt,t} \leq MAXPROD_{r,jt,t} \quad \forall r \in R, \forall jt \in J, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.12})$$

$$ep_{r,jt,t} \geq MINPROD_{r,jt,t} \quad \forall r \in R, \forall jt \in J, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.13})$$

3.4.7. Restricciones de operación de las tecnologías renovables

La energía que generan las tecnologías renovables variables (jr) está limitada por la disponibilidad del recurso (solar o eólico). La variabilidad del recurso energético impide utilizar la totalidad de la capacidad instalada en las tecnologías renovables; por ello, se emplea el factor de capacidad (CF) para estimar la fracción de la capacidad instalada que puede aprovecharse en cada región y en cada periodo de tiempo. También se considera la capacidad nueva a instalar de las tecnologías (ic^{renew}).

$$ep_{r,jr,t} = CAPROD_{r,jr,t} \cdot CF_{r,jr,t} + ic_{r,jr}^{renew} \cdot CF_{r,jr,t}, \quad \forall r \in R, \forall jr \in J, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.14})$$

3.4.8. Instalación de tecnologías renovables

Si resulta conveniente instalar alguna tecnología renovable (jr) en determinada región (r), la variable binaria y^{RENEW} toma el valor de 1. Si no es conveniente, la variable binaria toma un valor de cero. Además, las variables binarias permiten que la capacidad seleccionada de las tecnologías renovables ic^{renew} se encuentre en el intervalo de las capacidades mínimas y máximas disponibles en el mercado ($CMINRENEW$ y $CMAXRENEW$).

$$y_{r,jr}^{RENEW} (CMINRENEW_{r,jr}) \leq ic_{r,jr}^{renew}, \quad \forall r \in R, \forall jr \in J \quad (\text{Ec. 3.15})$$

$$y_{r,jr}^{RENEW} (CMAXRENEW_{r,jr}) \geq ic_{r,jr}^{renew}, \quad \forall r \in R, \forall i \in I \quad (\text{Ec. 3.16})$$

3.4.9. Sistemas de almacenamiento de energía

Instalación de sistemas de almacenamiento de energía

La decisión de instalar ESS (Energy Storage System, por sus siglas en inglés) se modela utilizando variables binarias. Si resulta conveniente instalar un sistema de almacenamiento en

determinada región (r) la variable binaria y^{ESS} toma el valor de 1. Si no es conveniente que exista un almacenador, la variable binaria (y^{ESS}) toma un valor de cero. Además, las variables binarias permiten que la capacidad seleccionada del sistema de almacenamiento ($icess$) se encuentre en el intervalo de las capacidades mínimas y máximas disponibles en el mercado ($CMINESS$ y $CMALESS$).

$$y_{r,i}^{ESS} (CMINESS_{r,i}) \leq icess_{r,i}, \quad \forall r \in R, \forall i \in I \quad (\text{Ec. 3.17})$$

$$y_{r,i}^{ESS} (CMALESS_{r,i}) \geq icess_{r,i}, \quad \forall r \in R, \forall i \in I \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Balance de energía en los sistemas de almacenamiento

Para poder conocer la cantidad de energía contenida en los sistemas de almacenamiento de energía ($ealm$) de cada región (r) en un tiempo determinado (t), se debe realizar un balance de energía que considere la energía que se carga y descarga en cada periodo de tiempo, así como sus respectivas eficiencias de carga y descarga (η^{car} y η^{des}).

$$ealm_{r,i,t} = ealm_{r,i,t-1} + \left(\sum_{jrt} ecar_{r,jrt,i,t} \right) (\eta_i^{car}) - \frac{edes_{r,i,t}}{\eta_i^{des}}, \quad \forall r \in R, \forall i \in I, \forall t > 1 \in T \quad (\text{Ec. 3.19})$$

$$ealm_{r,i,t} = EALM_{r,i}^0 + \left(\sum_{jrt} ecar_{r,jrt,i,t} \right) (\eta_i^{car}) - \frac{edes_{r,i,t}}{\eta_i^{des}}, \quad \forall r \in R, \forall i \in I, \forall t = 1 \in T \quad (\text{Ec. 3.20})$$

Restricciones de operación de los sistemas de almacenamiento de energía

La ecuación 3.21 restringe la cantidad de energía que se puede almacenar ($ealm$) para que dicha cantidad no supere la capacidad instalada de los ESSs ($icess$). También, se especifica que la cantidad de energía que se inyecta al sistema de almacenamiento ($ecar$) no supere la capacidad que cada tecnología puede recibir en un periodo de tiempo y que esta provenga de tecnologías convencionales disponibles (jrt).

$$ealm_{r,i,t} \leq icess_{r,i} \quad \forall r \in R, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.21})$$

$$\sum_{jrt} ecar_{r,jrt,i,t} (\eta_i^{car}) \leq icess_{r,i}, \quad \forall r \in R, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.22})$$

De igual manera, se limita la energía descargada ($edes$) del sistema de almacenamiento i en un tiempo t para que los ESSs no descarguen más electricidad de la que pueden.

$$\frac{edes_{r,i,t}}{\eta_i^{des}} \leq ices_{r,i}, \quad \forall r \in R, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.23})$$

Por otro lado, se especifican las siguientes ecuaciones que consideran la existencia de almacenadores de energía, además restringen la carga y descarga de almacenador en un mismo periodo de tiempo, obligando al modelo a la carga y descarga de un almacenador en un diferente periodo de tiempo determinado por medio de la variable binaria ω^{ESS} que se encuentra relacionada con el porcentaje de capacidad que puede descargar la batería *CAPDESC* y la capacidad de almacenamiento máxima *CMAXESS*.

$$\sum_{jrt} ecar_{r,jrt,i,t} \leq \omega_{r,i,t}^{ESS} (CAPDESC_{r,i}) (CMAXESS_{r,i}), \quad \forall r \in R, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.24})$$

$$edes_{r,i,t} \leq (1 - \omega_{r,i,t}^{ESS}) (CAPDESC_{r,i}) (CMAXESS_{r,i}), \quad \forall r \in R, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.25})$$

3.4.10. Integración y operación de sistemas de electrólisis y almacenamiento de H₂: instalación, balance y generación de H₂

Instalación de electrolizadores

La generación de H₂ depende de la cantidad de electricidad que se consume, pero el modelo de optimización debe tomar la decisión de instalar o no instalar electrolizadores, por lo que es necesario utilizar variables binarias (y). En este caso se considerará la instalación de un electrolizador que sea capaz de generar H₂ en función de la cantidad de electricidad que se le suministre. Además, si el electrolizador se instala, también se instalará un almacenador que sirva como almacenamiento temporal del combustible. El electrolizador y el almacenador de H₂ tendrán una capacidad mínima y una máxima que se puede instalar y el modelo deberá seleccionar una capacidad dentro del rango establecido.

Las variables binarias permiten que la capacidad óptima del electrolizador ic^{elect} se encuentre en el intervalo deseado (entre *CMIN* y *CMAX*). Si resulta conveniente instalar un electrolizador h en determinada región (r) la variable binaria (y^{elect}) toma el valor de 1. Si no es conveniente que exista un electrolizador, la variable binaria (y^{elect}) toma un valor de cero.

$$y_{r,h}^{elect} (CMIN_{r,h}^{elect}) \leq ic_{r,h}^{elect}, \quad \forall r \in R, \forall h \in H \quad (\text{Ec. 3.26})$$

$$y_{r,h}^{elect} (CMAX_{r,h}^{elect}) \geq ic_{r,h}^{elect}, \quad \forall r \in R, \forall h \in H \quad (\text{Ec. 3.27})$$

Sistema de almacenamiento de H_2

Si se instala el electrolizador h , entonces se instala el almacenador g . De esta manera, la variable binaria del electrolizador en la región r será 1 y, por tanto, se necesitará el almacenador de H_2 (EHS). En caso contrario, la variable binaria asociada al electrolizador será 0. Usando la siguiente expresión indicamos que y^{EHS} solo será 1 si y^{elect} también es 1 y será 0 cuando y^{elect} sea 0.

$$y_{r,h}^{elect} - y_{r,g}^{EHS} = 0, \quad \forall r \in R, \forall h \in H, \forall g \in G \quad (\text{Ec. 3.28})$$

Las variables binarias permiten que la capacidad óptima del almacenador ic^{EHS} se encuentre en el intervalo deseado (entre $CMIN$ y $CMAX$).

$$y_{r,g}^{EHS} (CMIN^{EHS}) \leq ic_{r,g}^{EHS}, \quad \forall r \in R, \forall g \in G \quad (\text{Ec. 3.29})$$

$$y_{r,g}^{EHS} (CMAX^{EHS}) \geq ic_{r,g}^{EHS}, \quad \forall r \in R, \forall g \in G \quad (\text{Ec. 3.30})$$

Operación del electrolizador

El electrolizador producirá masa de H_2 ($m_{r,h,t}^{H_2,gen}$) en función de la energía suministrada ($eelec$); sin embargo, no toda la energía suministrada es aprovechada al 100%, por ello se relaciona la eficiencia (η^{elect}) de los electrolizadores h . El modelo se restringe a la producción de H_2 proveniente de energía renovable jrt , con la finalidad de solo obtener hidrógeno verde.

$$\sum_{jrt} eelec_{r,jrt,h,t} (\eta_h^{elect}) = m_{r,h,t}^{H_2,gen}, \quad \forall r \in R, \forall h \in H, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.31})$$

La operación de los electrolizadores se encuentra relacionada con la capacidad del electrolizador (ic^{elect}) que debe ser mayor a la energía suministrada.

$$\sum_{jrt} eelec_{r,jrt,h,t} \leq ic_{r,h}^{elect}, \quad \forall r \in R, \forall h \in H, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.32})$$

Balance en el sistema de almacenamiento de H_2

Note que para representar el balance en los EHSs es necesario incluir las siguientes ecuaciones:

$$m_{r,g,t}^{EHS} - m_{r,g,t-1}^{EHS} = m_{r,h,t}^{H_2,gen} - \sum_{jg} m_{r,h,jg,t}^{H_2,burn}, \quad \forall r \in R, \forall g \in G, \forall h \in H, \forall t > 1 \in T \quad (\text{Ec. 3.33})$$

$$m_{r,g,t}^{EHS} - M_{r,0,g}^{EHS} = m_{r,h,t}^{H_2,gen} - \sum_{jg} m_{r,h,jg,t}^{H_2,burn}, \quad \forall r \in R, \forall g \in G, \forall h \in H, \forall t = 1 \in T \quad (\text{Ec. 3.34})$$

En donde $m_{r,h,t}^{H_2,burn}$ corresponde a la masa del H_2 usado en las centrales de potencia convencionales de gas natural y $m_{r,h,t}^{H_2,gen}$ a la masa de H_2 generado por el electrolizador h . En la ecuación 3.34 se incluye la cantidad de H_2 que contiene el almacenador en el tiempo cero $M_{r,0,g}^{EHS}$ como un parámetro. La ecuación 3.33 aplica para el resto de los periodos de tiempo.

H₂ generado y utilizado

La siguiente restricción garantiza que el H_2 que se quema ($m_{r,h,t}^{H_2,burn}$) sea siempre menor al que se genera en los electrolizadores ($m_{r,h,t}^{H_2,gen}$):

$$m_{r,h,t}^{H_2,gen} \geq \sum_{jg} m_{r,h,jg,t}^{H_2,burn}, \quad \forall r \in R, \forall h \in H, \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.35})$$

3.4.11. Restricciones de operación en la transmisión de energía

La energía transmitida ($etrans$) entre regiones debe considerar todos los flujos que pasan por una línea de transmisión. Este valor no debe superar la capacidad de enlace de transmisión CT de la línea. La energía es transmitida desde la región r hasta la región r' correspondiente a una región diferente.

$$CT \geq \sum_{r' \neq r} \sum_j etrans_{r',r,j,t}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.36})$$

3.4.12. Emisiones

Las emisiones totales se encuentran asociadas a la cantidad de combustible utilizado en cada región r , el cual es quemado en las centrales convencionales jrt . Se considera un factor de emisión $EMIS$ por tipo de tecnología, el cual especifica la cantidad de emisiones de CO_{2eq} generadas en la atmósfera por cantidad de combustible utilizado.

$$Emissions = \sum_t \left[\sum_{jc} \sum_r mcom_{r,jc,t} (EMIS_{jc}) \right] + \sum_t \left[\sum_{jg} \sum_r mgas_{r,jg,t} (EMIS_{jg}) \right] + \sum_t \left[\sum_{jg} \sum_h \sum_r m_{r,h,jg,t}^{H_2,burn} (EMIS_{jg}) \right] \quad (\text{Ec. 3.37})$$

3.4.13. Demanda no suministrada total

La demanda no suministrada *umdem* se usa para evitar soluciones infactibles. Es la diferencia entre la demanda requerida y la demanda cubierta por un sistema. En términos energéticos es la energía eléctrica que los usuarios requieren, pero que no se entrega debido a fallas como capacidad insuficiente de generación, fallas en la red o restricciones operativas.

$$umdemT = \sum_r \sum_t umdem_{r,t} \quad (\text{Ec. 3.38})$$

3.4.14. Costos de producción de energía

Energía convencional

Los costos en la producción de energía eléctrica en las tecnologías convencionales se encuentran dados por la relación entre la cantidad de energía que se produce *ep* en un tiempo *t* y un costo variable de producción en cada una de las tecnologías convencionales *jt*.

$$opex_t^{conv} = \sum_r \sum_{jt} ep_{r,jt,t} (CPROD_{jt}), \quad \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.39})$$

Energía renovable

Los costos en la producción de energía eléctrica renovable se encuentran dados por la relación entre la cantidad de energía que se produce *ep* en un tiempo *t* y un costo variable de producción *CPROD* en cada una de las tecnologías renovables *jrt*.

$$opex_t^{renw} = \sum_r \sum_{jrt} ep_{r,jrt,t} (CPROD_{jrt}), \quad \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.40})$$

3.4.15. Costos de transmisión

Los costos de transmisión se encuentran asociados al costo de transportar energía (*etrans*) de una región a otra, considerando un costo unitario de transmisión *CTRANS* desde la región *r* hasta la región *r'* a la que se transmite.

$$cost_t^{trans} = \sum_{r' \neq r} \sum_j etrans_{r,r',j,t} (CTRANS_{r,r'}), \quad \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.41})$$

3.4.16. Costo de instalación por equipo y costo de capital total

Sistemas de almacenamiento de energía

Los costos de en la instalación de almacenamiento consideran los costos de capital en función de la capacidad instalada del sistema de almacenamiento ($icess$). El costo de capital considera un costo (FC^{ESS}) que solo se toma en cuenta cuando se instalan estos sistemas, como se muestra a continuación:

$$Capex^{ess} = \sum_r \sum_i [FC_i^{ESS} icess_{r,i}] \quad (\text{Ec. 3.42})$$

Electrolizadores

Los electrolizadores consideran un cargo unitario (FC^{elect}) que, para ser activado, depende solo de la existencia de la unidad y multiplica la capacidad de la unidad ic^{elect} , como sigue:

$$Capex^{elect} = \sum_r \sum_h [FC_h^{elect} ic_{r,h}^{elect}] \quad (\text{Ec. 3.43})$$

Tanques almacenadores de H_2

El costo unitario de capital FC^{EHS} que, para ser activado, depende solo de la existencia de la unidad g , multiplica la capacidad de la unidad ic^{EHS} por el costo unitario, como sigue:

$$Capex^{EHS} = \sum_r \sum_g [FC_g^{EHS} ic_{r,g}^{EHS}] \quad (\text{Ec. 3.44})$$

Tecnologías renovables variables

La instalación de las tecnologías renovables (jr) considera un cargo unitario (FC^{renew}) relacionado con la capacidad de la unidad ic^{renew} .

$$Capex^{renew} = \sum_r \sum_{jr} [FC_{jr}^{renew} ic_{r,jr}^{renew}] \quad (\text{Ec. 3.45})$$

Costo de capital total

El costo de capital total considera los costos para la adquisición de las unidades de almacenadoras de energía e H_2 , electrolizadores y tecnologías renovables:

$$CostcapT = Capex^{ess} + Capex^{elect} + Capex^{EHS} + Capex^{renew} \quad (\text{Ec. 3.46})$$

3.4.17. Costo operativo por equipo y total

Almacenadores de energía

El costo de operación de los ESSs depende de la cantidad de energía contenida en los sistemas de almacenamiento ($ealm$) de cada región r y un costo operativo unitario variable (

$UC^{ess-CV-O\&M}$) de la unidad de almacenamiento i . También se considera un costo operativo fijo para cada una de las unidades de almacenamiento ($UC^{ess-CF-O\&M}$).

$$Opex_t^{ess} = \sum_r \sum_i ealm_{r,i,t} (UC_i^{ess-CV-O\&M}) + UC_i^{ess-CF-O\&M} y_{r,i}^{ESS}, \quad \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.47})$$

Electrolizadores

El costo de operación de los electrolizadores se cuantifica en términos de la masa de H_2 que se produce en el electrolizador ($m_{2,gen}^H$). Se requiere un costo operativo unitario del electrolizador (UC^{elect}).

$$Opex_t^{elect} = \sum_r \sum_h m_{r,h,t}^{H_2,gen} (UC_h^{elect}), \quad \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.48})$$

Almacenadores de H_2

El costo de operación de los almacenadores de H_2 se calcula en función de la masa de H_2 contenida en el almacenador g , a ello se asocia un costo operativo unitario del almacenador de H_2 (UC^{EHS}).

$$Opex_t^{EHS} = \sum_r \sum_g m_{r,g,t}^{EHS} (UC_g^{EHS}), \quad \forall t \in T \quad (\text{Ec. 3.49})$$

Costo operativo total

El costo operativo total considera los costos para el funcionamiento de las unidades almacenadoras de energía, electrolizadores y los almacenadores de H_2 :

$$CostopT = \sum_t Opex_t^{ess} + \sum_t Opex_t^{elect} + \sum_t Opex_t^{EHS} \quad (\text{Ec. 3.50})$$

3.4.18. Ganancias

La producción de hidrógeno verde tiene como finalidad ser utilizado como fuente de combustible en tecnologías convencionales que utilizan gas natural, teniendo así una mezcla de gas natural-hidrógeno, representando beneficios económicos y ambientales. Sin embargo, la producción de hidrógeno verde dentro del sistema puede generar cierto valor agregado ($Profit_{2,gen}^H$) que se encuentra asociado a un precio de venta unitario (PV^{elect}) que depende de la masa de H_2 generado en los electrolizadores h . La siguiente ecuación incluye el ingreso económico de la venta de hidrógeno verde:

$$Profit^{H_2,gen} = \sum_r \sum_h \sum_t m_{r,h,t}^{H_2,gen} (PV_h^{elect}) \quad (\text{Ec. 3.51})$$

3.4.19. Costo total

Se consideran los costos de producción de energía convencional y renovable, los costos de transmisión de energía a las diferentes regiones. También se considera el costo de capital en la adquisición de unidades de almacenamiento de energía e H_2 , electrolizadores y tecnologías renovables, así como los costos operativos de dichas unidades y la diferencia por la venta de H_2 . Por otro lado, se considera el costo asociado a las emisiones generadas, el cual se asocia a un impuesto medioambiental ($UC^{CARBONTAX}$) sobre las emisiones de CO_{2eq} . La energía no suministrada y aprovechada también es considerada por medio de un costo unitario (U^{UMDEMT} y U^{CUT}). Además, se considera un factor para anualizar la inversión (K^{inv}).

$$TC = \sum_t opex_t^{conv} + \sum_t opex_t^{renw} + \sum_t cost_t^{trans} + CostcapT(K^{inv}) + CostopT \\ cuT(U^{CUT}) + umdemT(U^{UMDEMT}) + Emisiones(U^{CARBONTAX}) - Profit^{H_2,gen} \quad (\text{Ec. 3.52})$$

3.4.20. Indicador del impacto material relativo

Este primer indicador (DMR) considera los recursos materiales utilizados durante el funcionamiento del sistema, además, lo hace desde una comparativa entre la medida de los recursos utilizados por energía producida.

$$DMR = \frac{Materialreq^{Norm}}{eprodtot} \quad (\text{Ec. 3.53})$$

En donde $Materialreq^{Norm}$ indica el impacto ambiental derivado del consumo de recursos materiales no renovables que conforman la infraestructura utilizada en el sistema, lo que hace referencia al agotamiento de los recursos al ser utilizados. El superíndice $Norm$ señala que la masa de cada material se encuentra normalizada mediante un factor que permite comparar distintos recursos con el propósito de realizar una comparación justa entre infraestructura utilizada, independientemente de los materiales que naturalmente la conforman. Por otro lado, la variable $eprodtot$ representa la energía producida por las distintas tecnologías (convencionales y renovables), que tiene como objetivo satisfacer una demanda $EDEM$ específica de energía en las regiones (r).

Los requerimientos materiales son dependientes de la infraestructura a analizar, es por ello que para la superestructura propuesta los requerimientos materiales $Materialreq_{renewvar}^{Norm}$, $Materialreq_{renewnonvar}^{Norm}$, $Materialreq_{conv}^{Norm}$, $Materialreq_{ESS}^{Norm}$, $Materialreq_{elect}^{Norm}$, y $Materialreq_{EHS}^{Norm}$ corresponden a las tecnologías renovables variables (jr), tecnologías renovables no variables (jr_h), tecnologías convencionales (jt), almacenadores de energía (i), electrolizadores (h) y almacenadores de H_2 (g), respectivamente. Los requerimientos materiales de la infraestructura participante son descritos como se muestra en las ecuaciones 3.54 – 3.59.

$$Materialreq_{renewvar}^{Norm} = \sum_r \sum_{jr} [ic_{r,jr}^{renewvar} REQ_{jr}^{renewvar}] \quad (\text{Ec. 3.54})$$

$$Materialreq_{renewnonvar}^{Norm} = \sum_r \sum_{jr_h} [CAPROD_{r,jr_h} REQ_{jr_h}^{renewnonvar}] \quad (\text{Ec. 3.55})$$

$$Materialreq_{conv}^{Norm} = \sum_r \sum_{jt} [CAPROD_{r,jt} REQ_{jt}^{conv}] \quad (\text{Ec. 3.56})$$

$$Materialreq_{ESS}^{Norm} = \sum_r \sum_i [icess_{r,i} REQ_i^{ESS}] \quad (\text{Ec. 3.57})$$

$$Materialreq_{elect}^{Norm} = \sum_r \sum_h [ic_{r,h}^{elect} REQ_h^{elect}] \quad (\text{Ec. 3.58})$$

$$Materialreq_{EHS}^{Norm} = \sum_r \sum_g [ic_{r,g}^{EHS} REQ_g^{EHS}] \quad (\text{Ec. 3.59})$$

En donde, REQ es un parámetro que establece el material requerido total en la infraestructura de los diferentes equipos, el cual se encuentra dado en masa de material normalizada por unidad de potencia o energía (dependiendo del equipo). Además, el primer término de las ecuaciones anteriores representa la capacidad (potencia o energía) de cada uno de los equipos. La energía producida total ($eprodtot$) es cuantificada como se muestra a continuación:

$$eprodtot = \sum_r \sum_j \sum_t ep_{r,j,t} \quad (\text{Ec. 3.60})$$

En donde (ep) es la energía producida por cada una de las tecnologías en las distintas regiones geográficas, en un periodo de tiempo específico (t). Es importante recalcar que para este estudio se considera exclusivamente la cuantificación de recursos materiales no renovables debido a que el impacto del agotamiento de recursos no renovables (finitos) no tiene comparación

con el impacto del agotamiento o uso de recursos renovables. Un atributo relevante del indicador es que no solo se centra en extender el ciclo de los materiales, sino utilizar solo los materiales necesarios cumpliendo con el funcionamiento del sistema.

3.4.21. Indicador del impacto material absoluto

Este segundo indicador (*DMA*) surge como consecuencia a la preocupación de limitar los recursos materiales con el concepto de disponibilidad. Como muestra de ello, dado un aumento de demanda energética (*EDEM*) y energía producida (*eprodtot*), la infraestructura requerida es mayor, lo que desfavorece la conservación del medio ambiente, es por esta razón que surge la necesidad de una métrica adicional de EC que considere este aspecto, como se puede ver a continuación.

$$DMA = Materialreq^{Norm} \quad (\text{Ec. 3.61})$$

De igual manera que para el primer indicador, *Materialreq^{Norm}* representa el impacto ambiental relacionado al consumo de recursos materiales no renovables que conforman la infraestructura utilizada en el sistema, y el superíndice *Norm* establece que la masa de cada material está ajustada por un factor que facilita la comparación entre distintos recursos. Este indicador da pautas para decidir en qué medida es conveniente instalar infraestructura y limitar el sistema físicamente, además, únicamente considera la disponibilidad de los recursos materiales, independiente de la energía producida.

3.4.22. Indicador de autosuficiencia energética

Este tercer indicador (*AE*) complementa los indicadores anteriores (*DMR* y *DMA*), analizando la relación entre sistemas productores y consumidores, busca reflejar la diferencia entre la energía producida y consumida dentro de una región.

$$AE = \frac{eprodtot - EDEM}{eprodtot} \quad (\text{Ec. 3.62})$$

EDEM es un parámetro establecido por los requerimientos del sistema, que representa la demanda energética. *eprodtot* es la energía producida en el sistema. Cabe resaltar que *AE* puede ser calculado para el sistema o individualmente para cada una de las regiones (*r*) participantes. Este indicador es una métrica que pretende conocer si los flujos energéticos que se producen en una región son autosuficientes y si no es así, conocer la organización entre regiones. El valor resultante evidencia si las regiones exportan o importan energía a través de sus interconexiones; si una región exporta energía, significa mayor demanda de recursos materiales para dicha región. Destacando que *AE* resalta la justicia ambiental, premiando al localismo.

3.4.23. Funciones objetivo

El problema se compone de objetivos económicos y ambientales. Las funciones objetivo $f_{o1}, f_{o2}, f_{o3}, f_{o4}$ y f_{o5} son representadas por las ecuaciones 3.63 – 3.67, respectivamente.

$$f_{o1} = \text{minimizing } (TC) \quad (\text{Ec. 3.63})$$

$$f_{o2} = \text{minimizing } (Emissions) \quad (\text{Ec. 3.64})$$

$$f_{o3} = \text{minimizing } (DMR) \quad (\text{Ec. 3.65})$$

$$f_{o4} = \text{minimizing } (DMA) \quad (\text{Ec. 3.66})$$

$$f_{o5} = \text{minimizing } (AE) \quad (\text{Ec. 3.67})$$

Donde *TC* es el costo total de la planificación, *Emissions* son las emisiones de CO_{2eq} emitidas en la producción de energía, *DMR*, *DMA* y *AE* son los indicadores de EC respecto al impacto material relativo, absoluto y autosuficiencia energética, respectivamente.

3.4.24. Estrategia de optimización multi-objetivo

Se aplica la técnica de programación compromiso a las diferentes *fo*, es indispensable una formulación multi-objetivo, la cual se muestra en la ecuación 3.68, sujeta a las restricciones 3.69 – 3.74:

$$\min \gamma \quad (\text{Ec. 3.68})$$

$$\frac{TC_{op} - TC_{id}}{TC_{nid} - TC_{id}} \cdot w_1 \leq \gamma \quad (\text{Ec. 3.69})$$

$$\frac{Emissions_{op} - Emissions_{id}}{Emissions_{nid} - Emissions_{id}} \cdot w_2 \leq \gamma \quad (\text{Ec. 3.70})$$

$$\frac{DMR_{op} - DMR_{id}}{DMR_{nid} - DMR_{id}} \cdot w_3 \leq \gamma \quad (\text{Ec. 3.71})$$

$$\frac{DMA_{op} - DMA_{id}}{DMA_{nid} - DMA_{id}} \cdot w_4 \leq \gamma \quad (\text{Ec. 3.72})$$

$$\frac{AE_{op} - AE_{id}}{AE_{nid} - AE_{id}} \cdot w_5 \leq \gamma \quad (\text{Ec. 3.73})$$

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 1 \quad (\text{Ec. 3.74})$$

γ representa la variable a minimizar. Los índices *id* y *nid* corresponden a los valores ideales y no ideales para las soluciones respectivamente, representando los puntos fuera de la curva de Pareto en la técnica de programación compromiso. En este caso, el valor *id* de cada función objetivo se alcanza minimizando la respectiva función (optimización mono-objetivo) y el valor *nid* se alcanza maximizando la función, con independencia de los otros objetivos. Los parámetros w_1 , w_2 , w_3 , w_4 y w_5 representan los pesos relativos de cada función objetivo (importancia relativa), los cuales son establecidos de acuerdo a las necesidades de cada función. El índice *op* corresponde al valor óptimo encontrado para cada una de las funciones objetivo al ser aplicada la optimización multi-objetivo.

La formulación multi-objetivo está sujeta a todas las restricciones anteriores. El enfoque presentado corresponde a un problema de programación no lineal de enteros mixtos (MINLP), donde se desea minimizar γ . Adicionalmente, el modelo matemático desarrollado es aplicable a cualquier región, siempre y cuando se considere la configuración de la red.

Capítulo IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Introducción

En el presente capítulo se presenta el caso de estudio analizado conforme al modelo matemático desarrollado en el capítulo anterior. Asimismo, se describe la implementación de la metodología propuesta y se exponen los resultados derivados de la codificación y resolución del modelo matemático. Este análisis permite evaluar el desempeño del sistema bajo las condiciones planteadas y constituye la base para la discusión de los resultados en las secciones posteriores.

4.2. Implementación de la metodología

La formulación de optimización propuesta fue codificada en el software GAMS®. El modelo MINLP del caso de estudio incluye 334,794 variables continuas, 9,450 variables binarias, 263,503 restricciones; se resolvió en un procesador AMD Radeon™ a 2.3 GHz y 8 GB de RAM en 7,200 s de tiempo de CPU, usando DICOPT. Una vez implementado el modelo matemático propuesto y considerando la información del caso de estudio, se obtienen los siguientes resultados.

Es fundamental mencionar que la no linealidad en la formulación de optimización propuesta da como resultado un problema no convexo. Sin embargo, para abordar el problema con optimizadores locales, el modelo se resolvió en dos etapas. La primera etapa consiste en resolver el problema como un MIP (Programación Entera Mixta), donde no se consideran las ecuaciones no lineales; en la segunda etapa, con los valores iniciales resultantes, el problema se resuelve como un MINLP. Además, se realizaron pruebas para este caso de estudio, donde se obtuvieron resultados muy similares para la función objetivo al utilizar optimizadores locales y globales. No obstante, la principal diferencia radica en el considerable tiempo de cálculo del solucionador global.

4.3. Descripción del caso de estudio

Se selecciona un caso de estudio en México, en particular, se estudia el sistema eléctrico peninsular con la finalidad de mostrar la aplicabilidad del modelo e ilustrar los resultados. Se

considera la producción de energía eléctrica en la península, la cual engloba las siguientes regiones de transmisión: Grijalva (RA), Tabasco (RB), Campeche (RC), Mérida (RD), Chetumal (RE), Cancún (RF), y Cozumel (RG), en donde a cada región le corresponde una línea de transmisión que tiene como función llevar la energía eléctrica a distintas distancias (ver **Figura 4.1**). En México, la energía es distribuida por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) desde las centrales generadoras, el SEN está integrado por 10 regiones de control (peninsular, oriental, central, occidental, noroeste, norte, noreste, Baja California, Baja California Sur y Sistema Mulegé), de las cuales 7 se encuentran interconectadas (SENER, 2018). En estas regiones de control se concentra el mayor consumo de energía eléctrica nacional; es por esta razón que el intercambio de energía entre regiones es una posibilidad ante situaciones de demanda energética. A su vez, las regiones de control comprenden un conjunto de regiones de transmisión que se encuentran interconectadas y son capaces de intercambiar energía entre ellas. En la actualidad la región de control peninsular tiene una alta demanda energética de acuerdo a distintos factores (p. ej., población y actividades económicas), por lo que se requiere de la instalación de tecnologías de generación de energía y el intercambio de energía para satisfacer las demandas energéticas futuras y garantizar el cumplimiento del SEN.

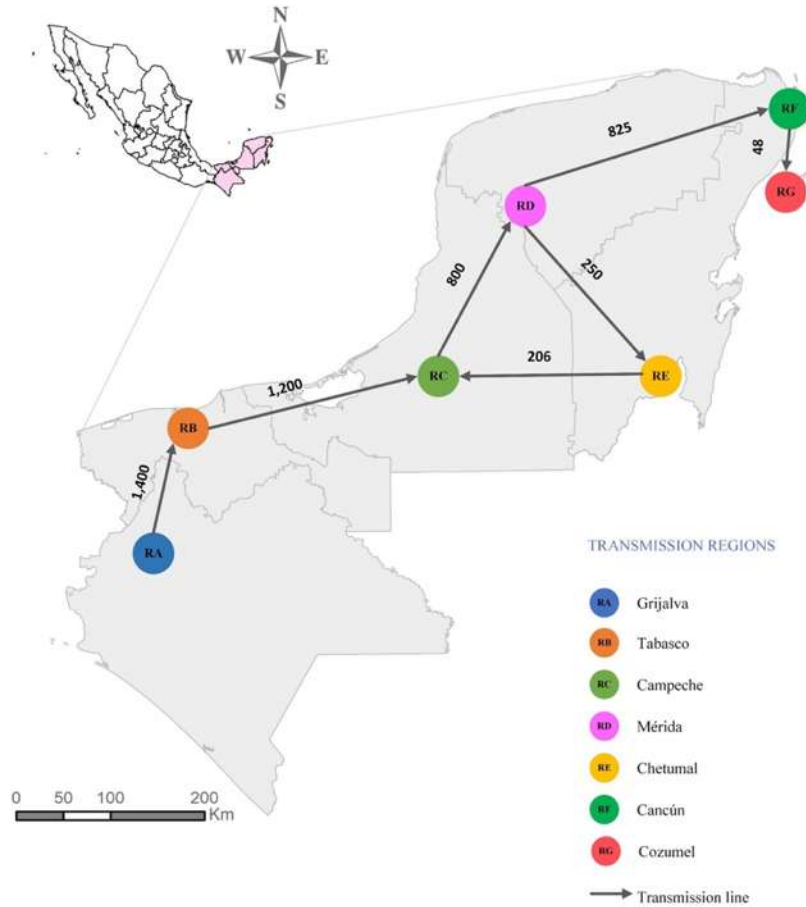


Figura 4. 3. Región de transmisión peninsular en México (tomada de Serrano-Arévalo et al., 2023).

Por otro lado, actualmente el abastecimiento de energía eléctrica en la península se genera con distintos tipos de tecnologías energéticas, de las cuales se han seleccionado las ocho más importantes debido a que son las que aportan mayor cantidad de energía eléctrica en la producción total (SENER, 2018), además, estas tecnologías se clasifican en convencionales y renovables. Las tecnologías convencionales incluyen turbogas, ciclo combinado, cogeneración eficiente, combustión interna y termoeléctrica, mientras las tecnologías renovables que requieren recursos energéticos variables en los sistemas de potencia incluyen eólica y solar (están limitadas por la disponibilidad del recurso) y, por último, dentro de las tecnologías renovables no variables se considera la hidroeléctrica. Por otro lado, se seleccionará el tipo de tecnología necesaria para satisfacer la demanda energética a lo largo de un periodo determinado, así como la instalación de electrolizadores y almacenadores de H_2 y energía necesarios para la producción de hidrógeno

verde. También se muestran las capacidades necesarias de producción energética de las tecnologías y la producción de H_2 en los electrolizadores para posteriormente utilizarlo dentro del sistema como una mezcla de gas natural-hidrógeno en las tecnologías convencionales. Se han tomado los parámetros necesarios de informes técnicos con datos actualizados (SENER, 2018) para ser utilizados en la optimización del modelo, los cuales se muestran en la **Tabla 4.1**; también se consideran otros parámetros como capacidades de equipos, costos operativos y de mantenimiento, eficiencias de carga y funcionamiento, factores de emisiones (INECC, 2020). La eficiencia de transporte de energía se considera de 95% de una región a otra, es decir, se pierde hasta un 5% de la energía total transmitida en este lapso de distribución. Mientras que los factores para anualizar la inversión de las unidades de almacenamiento, electrolizadores y tecnologías renovables (K^{inv}) tienen un valor de 0.1. Las capacidades de los electrolizadores son de un mínimo de 1 MWh y un máximo de 10 MWh, los almacenadores de H_2 de un mínimo de 0.001 ton y un máximo de 0.00354 ton (50 L) (Preuster et al., 2017) y el costo de producción de H_2 en los electrolizadores es de 3900 US\$/ton H_2 (Chi y Yu, 2018). Se considera que las tecnologías convencionales logran funcionar por medio de gas natural, H_2 o combustóleo, en este sentido, los valores caloríficos bajos ($LHVG$, $LHVH$, $LHVC$) corresponden a 50.03 GJ / ton, 119.90 GJ / ton y 40.10 GJ / ton, respectivamente (van den Broek et al., 2000; İlbaş y Karyeyen, 2015).

Para este caso en específico, los almacenadores de energía son considerados como baterías de ión de litio (Li-Ion) y batería redox de vanadio (BRV) (INECC, 2020). La producción de emisiones representa un impuesto medioambiental (*CARBONTAX*), el cual es considerado de 3 US\$/tonCO_{2eq}, el cual fue elegido de acuerdo a las condiciones del país en estudio (Renner, 2018) y costo unitario de energía no suministrada de 2600 US\$/MWh (SENER, 2018). Se considera una generación máxima de 40% en tecnologías convencionales (SENER, 2018). Con la finalidad de caracterizar el sistema en un horizonte temporal, sin la necesidad de cantidades masivas de recursos informáticos, se selecciona de manera óptima un numero pequeño de semanas representativas que caracterizan conjuntamente la demanda energética y la producción de recursos energéticos variables por medio de una metodología (De Sisternes Jimenez y Webster, 2013) que da como resultado una aproximación valida en la planificación de un horizonte de tiempo a largo plazo. En este trabajo se considera el análisis de 4 semanas representativas correspondientes a 672 horas, las cuales fueron seleccionadas de 52 semanas

totales (8760 horas) correspondientes a un año por medio de la metodología antes descrita. Es importante destacar que, en este trabajo, la metodología propuesta se utilizó en México debido a la disponibilidad de datos para la planificación en la península mexicana (Grijalva, Tabasco, Campeche, Mérida, Chetumal, Cancún y Cozumel). Además, esta región presenta problemas de suministro de gas natural y grandes posibilidades para el uso de energías renovables, lo que la convierte en una buena candidata para aplicar el modelo matemático.

Tabla 4. 1. Parámetros de capacidades de tecnologías y almacenadores de energía (SENER, 2018; INECC, 2020)

Tecnología	Capacidad de producción (MW)						
	Grijalva (RA)	Tabasco (RB)	Campeche (RC)	Mérida (RD)	Chetumal (RE)	Cancún (RF)	Cozumel (RG)
Convencional							
Turbogas	121.00	217.00	47.00	60.00	71.20	190.00	53.00
Ciclo combinado	0.00	0.00	252.40	1229.00	0.00	0.00	0.00
Cogeneración eficiente	0.00	367.00	112.50	243.00	0.00	0.00	0.00
Combustión interna	1.00	47.00	0.00	13.13	0.00	0.00	0.00
Termoeléctrica convencional	0.00	0.00	0.00	1.06	0.00	3.20	0.00
Renovable variable							
Eólica	17.37	0.00	40.36	145.31	8.07	18.19	5.05
Solar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Renovable no variable							
Hidroeléctrica	4828.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Clasificación	Almacenadores de energía						
	Eficiencia de carga	Eficiencia de descarga	Costos fijos (US\$)	Costos variables (US\$ / MWh)	Capacidad máxima (MW)	Capacidad mínima (MW)	Energía en el tiempo cero (MWh)
Li-Ion	0.98	0.98	540.00	2220.00	100.00	6.00	0.00
BRV (Batería redox de vanadio)	0.85	0.85	944.00	1000.00	100.00	6.65	0.00

La producción de energía nueva requiere de la adquisición de infraestructura (tecnologías, baterías, electrolizadores y almacenadores de H₂) por lo que los indicadores de EC pueden ser implementados en casos de estudio referentes al sector energético, estos indicadores cuantifican los requerimientos materiales de la infraestructura. Para obtener el parámetro (*REQ*) se requiere identificar la masa de los distintos materiales que componen cada uno de los equipos requeridos

por el sistema. Posteriormente se asigna un factor de normalización (*Norm*) que caracteriza las masas de los materiales y subsiguientemente agruparlas como una sola medida.

Los factores de normalización son una relación entre la magnitud cuantificada de una categoría de impacto y un valor de referencia. En este trabajo, el factor de normalización utilizado es el ADP, un indicador que considera el agotamiento de recursos como una categoría de impacto, de modo que se centra en cómo la extracción de recursos minerales y combustibles fósiles afecta al ecosistema (Bocken et al., 2016). La unidad de referencia de este indicador es la masa equivalente de antimonio (masa Sb_{eq}), que permite cuantificar materiales no renovables independientemente de su naturaleza. El factor de normalización es una de las fases del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) que corresponde al Análisis de Impactos Potenciales (AIP) (Bocken et al., 2016; Curran, 2013); sin embargo, este trabajo no pretende realizar un estudio completo del análisis del ciclo de vida, sino enfocarse en la fase inicial. La **Tabla 4.2** muestra los factores de normalización utilizados como parámetros para la infraestructura requerida en el sistema.

Tabla 4. 2. Factores de normalización (van Oers et al., 2020; Wernet et al., 2016).

Material	ADP (ton Sb_{eq} / ton)	Material	ADP (ton Sb_{eq} / ton)
Cemento	1.590×10^{-3}	Mesocarbono negro de acetileno	4.003×10^{-2}
Fe	1.100×10^{-6}	Microperlas	2.847×10^{-2}
Al	4.200×10^{-8}	Sulfuro de polifenileno	6.999×10^{-2}
Cu	2.700×10^{-2}	Carbón	3.707×10^{-3}
Óxido de litio y manganeso	2.753×10^{-2}	Chatarra de hierro	5.637×10^{-4}
Acero inoxidable	3.529×10^{-2}	Caliza	2.580×10^{-5}
Hierro fundido	1.142×10^{-2}	Níquel	1.200×10^{-3}
Resina epóxica	5.947×10^{-2}	Sulfuro de níquel	3.476×10^{-2}
Fibra de vidrio	1.727×10^{-2}	Polisulfona	1.120×10^{-1}
Concreto	4.072×10^{-4}	-	-

Utilizando los factores de caracterización ADP (Sb_{eq}), las masas de los componentes participantes en la infraestructura son normalizadas. La **Tabla 4.3** muestra los valores de los requerimientos materiales normalizados (*REQ*) para cada uno de los equipos requeridos en el sistema. Es importante destacar que esta tabla reúne información clave para integrar la EC en la

fase de diseño en el proceso de generación y almacenamiento de energía e H_2 , constituyendo un aporte que no ha sido previamente reportado en la literatura existente.

Tabla 4. 3. Requerimientos materiales de la infraestructura participante en el sistema (valores calculados en este trabajo basados en los datos de la Tabla 4.2).

Infraestructura	Requerimientos materiales	Unidades
<i>Tecnologías</i>		
Turbogas	1.060×10^{-1}	ton Sb eq / MW
Ciclo combinado	1.555×10^{-1}	ton Sb eq / MW
Cogeneración eficiente	41.86×10^{-1}	ton Sb eq / MW
Combustión interna	2.344×10^{-2}	ton Sb eq / MW
Termoeléctrica convencional	4.945×10^{-2}	ton Sb eq / MW
Eólica	62.32×10^{-1}	ton Sb eq / MW
Solar	2.344×10^{-1}	ton Sb eq / MW
Hidroeléctrica	5.236×10^{-1}	ton Sb eq / MW
<i>Baterías</i>		
Li-Ion	6.588×10^{-5}	ton Sb eq / MWh
BRV	7.886×10^{-2}	ton Sb eq / MWh
<i>Electrolizadores</i>	2.701×10^{-1}	ton Sb eq / MW
<i>Almacenadores de H_2</i>	2.517×10^{-7}	ton Sb eq / ton H_2

Un punto importante es determinar la instalación de nuevas tecnologías en las regiones, lo cual depende de la disponibilidad de recursos naturales (en el caso de las tecnologías renovables) o, en otras palabras, del factor de capacidad (CF). Esto, para satisfacer la mayor cantidad de energía requerida, además de determinar la capacidad óptima de instalación (ic^{renew}), se consideran las capacidades mínimas ($C_{MINRENEW}$) y máximas ($C_{MAXRENEW}$), sujetas a las capacidades ya existentes, que se definen como las capacidades máximas que se pueden instalar, lo que permite restringir la operación en cada región. Esto se puede observar en el modelo matemático.

4.4. Análisis de resultados

Una vez implementada la formulación del modelo matemático y considerando la información previamente descrita en el caso de estudio, se obtienen los siguientes resultados. Primeramente, se realiza una optimización mono-objetivo con la finalidad de obtener el valor

ideal (*id*) y no ideal (*nid*) de cada una de las funciones objetivo correspondientes a las ecuaciones 3.63 – 3.67, el primer valor se obtiene minimizando las respectivas funciones independientemente y el valor *nid* se alcanza maximizando las funciones, con independencia de los otros objetivos. La **Tabla 4.4** muestra los valores *id* y *nid* de las funciones objetivo económicas, ambientales y de EC. Estos valores son necesarios para ejecutar la optimización multi-objetivo descrita en la ecuación 3.68.

Tabla 4. 4. Valores no ideales e ideales en la optimización mono-objetivo.

Concepto	<i>nid</i>	<i>id</i>
<i>TC</i> (US\$)	5.514×10^7	5.169×10^6
<i>Emissions</i> (ton CO _{2eq})	4.329×10^5	1.819×10^5
<i>DMR</i> (ton Sb _{eq} / MWh)	7.800×10^{-3}	2.800×10^{-3}
<i>DMA</i> (ton Sb _{eq})	1.483×10^4	5.896×10^3
<i>AE</i>	7.323×10^2	1.619×10^1

Antes de implementar la optimización mono-objetivo antes descrita a cada una de las funciones objetivo, se estimó el precio mínimo de venta necesario para que el sistema energético produzca H₂ con beneficios económicos y ambientales. Este procedimiento asegura la producción de hidrógeno verde cuando se realiza una optimización económica mono-objetivo (minimizando *TC*), evitando que el modelo se limite únicamente a cubrir la demanda eléctrica regional. El precio resultante fue de US\$4200/tonH₂, en concordancia con valores reportados en la literatura (Kavadias et al., 2022), a partir de lo anterior, este valor se utiliza como parámetro en el modelo matemático.

Dado que la formulación busca la solución de las funciones objetivo en conjunto, la técnica de programación compromiso es aplicada. Los valores mostrados en la **Tabla 4.4** son utilizados en las restricciones 3.69 – 3.74, además, se considera un peso relativo igual para cada una de las funciones objetivo (*TC*, *Emissions*, *DMR*, *DMA* y *AE*) de 0.2 para w_1 , w_2 , w_3 , w_4 y w_5 . En consecuencia, γ es minimizado en una optimización multi-objetivo, resultando un valor de 0.0319. Los resultados para las diferentes funciones objetivo son mostrados en la **Tabla 4.5**, en donde al minimizar cada una de las funciones objetivo se considera que el peso relativo para esta función corresponde a 1, lo que corresponde a un peso relativo de cero para las funciones

objetivo restantes. Es importante mencionar que los resultados mostrados de la optimización multi-objetivo (con $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 = 0.2$) son los correspondientes a los valores óptimos (TC_{op} , $Emissions_{op}$, DMR_{op} , DMA_{op} y AE_{op}) de dicha optimización. Los resultados muestran que los valores óptimos son mayores a los encontrados cuando se asigna un peso relativo de 1 para cada una de ellas, debido a que los pesos relativos disminuyen (de 1 a 0.2), lo que tiene como consecuencia asignar importancias equitativas, en este sentido, el TC aumenta de US\$ 5.169 x 10⁶ a US\$ 1.314 x 10⁷, las $Emissions$ aumentan un 22.04%; en cuanto a los indicadores de EC DMR y DMA aumentan un 28.57% y 15.21%, respectivamente, mientras que AE es la función que mayor aumento tiene con un valor de 1.619 x 10¹ a 1.305 x 10², lo que corresponde a un aumento del 706.09%.

Tabla 4. 5. Optimización multi-objetivo.

	TC	$Emissions$	DMR	DMA	AE
Peso relativo	$w_1=1$	$w_2=0$	$w_3=0$	$w_4=0$	$w_5=0$
Óptimo (op)	5.169 x 10 ⁶	2.524 x 10 ⁵	3.300 x 10 ⁻³	6.263 x 10 ³	2.052 x 10 ²
	TC	$Emissions$	DMR	DMA	AE
Peso relativo	$w_1=0$	$w_2=1$	$w_3=0$	$w_4=0$	$w_5=0$
Óptimo (op)	3.293 x 10 ⁷	1.819 x 10 ⁵	7.700 x 10 ⁻³	1.483 x 10 ⁴	1.638 x 10 ²
	TC	$Emissions$	DMR	DMA	AE
Peso relativo	$w_1=0$	$w_2=0$	$w_3=1$	$w_4=0$	$w_5=0$
Óptimo (op)	1.311 x 10 ⁷	4.218 x 10 ⁵	2.800 x 10 ⁻³	6.228 x 10 ³	2.898 x 10 ¹
	TC	$Emissions$	DMR	DMA	AE
Peso relativo	$w_1=0$	$w_2=0$	$w_3=0$	$w_4=1$	$w_5=0$
Óptimo (op)	8.076 x 10 ⁶	2.926 x 10 ⁵	3.100 x 10 ⁻³	5.896 x 10 ³	7.615 x 10 ¹
	TC	$Emissions$	DMR	DMA	AE
Peso relativo	$w_1=0$	$w_2=0$	$w_3=0$	$w_4=0$	$w_5=1$
Óptimo (op)	2.863 x 10 ⁷	3.457 x 10 ⁵	6.600 x 10 ⁻³	1.232 x 10 ⁴	1.619 x 10 ¹
	TC	$Emissions$	DMR	DMA	AE
Peso relativo	$w_1=0.2$	$w_2=0.2$	$w_3=0.2$	$w_4=0.2$	$w_5=0.2$
Óptimo (op)	1.314 x 10 ⁷	2.219 x 10 ⁵	3.600 x 10 ⁻³	6.793 x 10 ³	1.305 x 10 ²

Por otro lado, es destacable analizar el comportamiento del sistema para cada una de las opciones descritas anteriormente, es por ello que la **Tabla 4.6** muestra los resultados obtenidos para la energía producida total ($eprodtot$) en cada una de las regiones respecto a la demanda energética ($EDEM$), lo que permite conocer la autosuficiencia energética. La $EDEM$ en cada una de las regiones es la misma, debido a que es un parámetro asignado y es independiente de los

pesos relativos, para este caso, la demanda de energía total es de 1.774×10^6 MWh. De manera general, la demanda producida muestra un comportamiento similar para los distintos pesos relativos asignados, en donde para $RT^{Grijalva}$, $RT^{Campeche}$, $RT^{Chetumal}$ y RT^{Cancun} la energía producida localmente es menor a la energía demandada, por lo que estas regiones requieren que otras regiones importen energía para satisfacer sus necesidades energéticas, contrario a las regiones $RT^{Tabasco}$, RT^{Merida} y $RT^{Cozumel}$, en donde estas son capaces de autosatisfacer sus necesidades energéticas, además tiene la oportunidad de exportar el excedente de energía que producen. De manera global, la demanda sobrante en regiones con excedentes de energía es transmitida para los requerimientos de otras regiones, esto sucede con la finalidad de cumplir con los requerimientos de demanda energética en la península mexicana, en este sentido para el caso en donde $w_1=1$ en el balance global la energía, la $eprodtot$ es de 1.887×10^6 MWh y la $EDEM$ de 1.774×10^6 MWh con un excedente de 1.133×10^5 MWh lo que representa un 6.39% de la energía sobrante respecto a la total, mientras que en los casos $w_2=1$, $w_3=1$, $w_4=1$ and $w_5=1$ tienen un excedente de energía de 8.64%, 24.70%, 6.87% y 5.03 %, respectivamente, además para los pesos relativos de $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5=0.20$ tienen un valor de 1.889×10^6 MWh para $eprodtot$ con un excedente de 1.155×10^5 MWh lo que representa un 6.51%. La producción de energía es dependiente de los pesos relativos asignados, es decir, se centra en el objetivo buscado (económico, ambiental o de EC), con lo que el sistema opta por producir energía con distintas combinaciones posibles de tecnologías, lo que implica distintos costos, emisiones e infraestructura utilizada.

Tabla 4. 6. Autosuficiencia energética en cada una de las regiones.

Concepto		Energía producida (MWh)					
Región	Demanda (MWh)	$w_1=1$	$w_2=1$	$w_3=1$	$w_4=1$	$w_5=1$	$w_1, w_2, \dots w_5=0.2$
$RT^{Grijalva}$	5.431×10^5	7.504×10^4	4.492×10^4	1.690×10^5	1.121×10^5	1.696×10^5	6.595×10^4
$RT^{Tabasco}$	3.495×10^5	1.286×10^6	1.309×10^6	1.341×10^6	1.287×10^6	1.094×10^6	1.291×10^6
$RT^{Campeche}$	1.348×10^5	1.023×10^5	8.465×10^4	1.147×10^5	8.037×10^4	1.393×10^5	7.890×10^4
RT^{Merida}	2.781×10^5	3.684×10^5	3.540×10^5	4.688×10^5	3.382×10^5	3.033×10^5	3.693×10^5
$RT^{Chetumal}$	4.067×10^5	2.964×10^4	5.578×10^4	7.016×10^4	4.704×10^4	9.465×10^4	4.571×10^4
RT^{Cancun}	3.961×10^4	1.681×10^4	3.502×10^4	2.527×10^4	1.981×10^4	3.982×10^4	1.979×10^4
$RT^{Cozumel}$	2.172×10^4	9.178×10^3	4.316×10^4	2.235×10^4	1.128×10^4	2.180×10^4	1.798×10^4
Total	1.774×10^6	1.887×10^6	1.927×10^6	2.212×10^6	1.895×10^6	1.863×10^6	1.889×10^6

Además, con la finalidad de mostrar el efecto que tienen los indicadores de EC ($w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 = 0.2$) sobre el diseño de un sistema energético convencional que solo considera objetivos económicos y de emisiones ($w_1=0.5$ y $w_2=0.5$), la **Tabla 4.5** muestra los resultados para las diferentes funciones objetivo en donde como era de esperarse cuando se asigna un peso relativo menor sobre *TC* y *Emissions* (de 0.5 a 0.2), resulta un incremento para *TC* del 5.97% (de US\$ 2.094×10^5 a US\$ 2.219×10^5) y del 23.29% para *Emissions* respecto al diseño convencional, sin embargo al considerar los indicadores de EC dentro de la optimización multi-objetivo se encuentran grandes ventajas respecto a cuando no son considerados, en donde *DMR* disminuye un 21.74%, *DMA* logra un ahorro importante de 1.832×10^3 tonSb_{eq} y *AE* tiene un aumento del 10.77%. Por otro lado, la **Tabla 4.5** muestra que para los pesos relativos de $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 = 0.2$ se tiene un valor de 1.889×10^6 MWh para *eprodtot* con un excedente de 1.155×10^5 MWh lo que representa un 6.51%, mientras que para $w_1 = 0.5$ y $w_2 = 0.5$ se tiene un excedente de energía de 6.17%.

Este trabajo se centra en la optimización multi-objetivo; por ello, en secciones previas se presentó la metodología para su implementación. A continuación, se analizan los resultados de la optimización multi-objetivo relacionados con la EC. Los requerimientos materiales se obtienen al cuantificar los materiales de los equipos participantes en el sistema, estos requerimientos se encuentran dados por los valores de la **Tabla 4.3**, los cuales son dependientes de la potencia entregada en el caso de las tecnologías y los electrolizadores, así como de la energía y masa almacenadas en el caso de las baterías y almacenadores de H₂, de acuerdo a las ecuaciones 3.54 – 3.59. Estas potencias y energías se obtienen de acuerdo a los equipos nuevos y existentes totales que el sistema requiere, los requerimientos materiales en la optimización multi-objetivo son de 6.793×10^3 ton Sb_{eq}, de los cuales 9.072×10^2 ton Sb_{eq} corresponden a infraestructura de tecnologías renovables ($Materialreq_{renewvar}^{Norm}$), representando el 13.36% del total; además, los requerimientos materiales de tecnologías renovables no variables ($Materialreq_{renewnonvar}^{Norm}$) son de 2.530×10^3 ton Sb_{eq} (37.24% del total), los equipos con mayores requerimientos materiales corresponden a las tecnologías convencionales ($Materialreq_{conv}^{Norm}$) con un 49.11% (3.336×10^3 ton Sb_{eq}), al contrario de las baterías ($Materialreq_{ESS}^{Norm}$) con un 0.29% (1.953×10^1 ton Sb_{eq}), mientras que los requerimientos materiales de electrolizadores ($Materialreq_{elect}^{Norm}$) y almacenadores de H₂ (

$Materialreq_{EHS}^{Norm}$) son nulos debido a la ausencia de producción de H_2 en el sistema. Es relevante mencionar que en el sistema estudiado con los pesos relativos asignados de $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 = 0.2$, no es posible la producción de H_2 , debido a que el peso de la función objetivo económica (w_1) no es suficientemente alto para beneficiar aspectos económicos relacionados con las ganancias de la producción de H_2 . El TC resultante es de US\$ 1.314×10^7 con $Emissions$ de 2.219×10^5 ton CO_{2eq} , respecto a los indicadores de economía circular se tiene un DMR de 3.600×10^{-3} ton Sb_{eq} / MWh, 6.793×10^3 ton Sb_{eq} para DMA (correspondiente a los requerimientos materiales totales del sistema) y 1.305×10^2 para AE . La producción de energía total es de 1.888×10^6 MWh de la cual 4.659×10^5 MWh es producida por tecnologías convencionales, lo que corresponde a un 24.68% del total, 7.87% proveniente de tecnologías renovables variables y 67.45% de tecnologías renovables no variables. El factor de emisión es calculado con la relación entre las emisiones emitidas en el proceso de producción de energía total, resultando de 0.118 ton CO_{2eq} / MWh. Debido a que la adquisición de equipos para satisfacer los requerimientos energéticos en el sistema es una opción, las regiones de transmisión $RT^{Campeche}$ y $RT^{Chetumal}$ requieren 7.886 MW y 115.158 MW, respectivamente, para las tecnologías eólicas, y todas las regiones de transmisión a excepción de $RT^{Grijalva}$ requieren 100 MW en tecnologías de producción de energía solar. Además, $RT^{Tabasco}$, $RT^{Campeche}$, RT^{Merida} , $RT^{Chetumal}$, RT^{Cancun} y $RT^{Cozumel}$ requieren 100 MWh, 100 MWh, 100 MWh, 100 MWh, 88.986 MWh y 96.764 MWh, respectivamente, en baterías de Li-Ion, mientras que requieren 70.258 MWh, 23.419 MWh, 34.160 MWh, 25.620 MWh, 33.930 MWh y 59.780 MWh en BRV. Debido a que no es posible la producción de H_2 , no se requiere la instalación de electrolizadores y almacenadores de H_2 . La energía producida por todas las regiones de transmisión es de 1.889×10^6 MWh y de acuerdo a la demanda energética, el sistema tiene un excedente de 1.155×10^5 MWh, lo que representa un 6.51% de energía sobrante. Además, cabe destacar que el sistema opta por utilizar el conjunto de equipos que representan la menor carga ambiental en el consumo de recursos no renovables, sin dejar de lado que son necesarios para satisfacer el sistema energético. Es evidente que, con la incorporación de indicadores EC, el sistema es selectivo en los equipos que representan el menor consumo de recursos, por lo que opta principalmente por la instalación de baterías (Li-Ion) y tecnologías solares renovables.

Por otro lado, la **Figura 4.2** muestra los valores *id* y *nid* implementados en la técnica de programación compromiso, además, se muestran los valores *op* de la solución en la optimización multi-objetivo. Con la finalidad de mostrar de mejor manera los resultados, los objetivos económicos, ambientales y de EC han sido normalizados. Los valores *op* encontrados al minimizar γ (resultando de 0.0319), muestran un aumento respecto a los valores *id*. El *TC* es casi triplicado (aumentado un 154.18%), incrementando su valor de US\$ 5.169×10^6 a US\$ 1.314×10^7 , las *Emissions* tienen un incremento del 22.04% (1.819×10^5 ton CO_{2eq} a 2.219×10^5 ton CO_{2eq}), el indicador de impacto material relativo (*DMR*) incrementa 8.000×10^{-4} ton Sb_{eq} / MWh, lo que representa un 28.57% , mientras que el indicadores del impacto material absoluto (*DMA*) es aquel que menor aumento tiene (15.21%) con un 8.969×10^2 ton Sb_{eq}; por otro lado, el indicador de autosuficiencia energética (*AE*) incrementa su valor de 1.619×10^1 a 1.305×10^2 , lo que corresponde a un aumento del 706.09%. Además, los valores *op* encontrados al minimizar γ , muestran una gran disminución respecto a los valores *nid*, en este sentido *TC* logra disminuir 76.17% desde US\$ 5.514×10^7 hasta US\$ 1.314×10^7 , las *Emissions* logran una disminución de 2.109×10^5 ton CO_{2eq} (48.73%); *DMR*, *AE* y *DMA* disminuyen 4.200×10^{-3} ton Sb_{eq} / MWh (53.85%), 6.018×10^2 (82.18%) y 8.036×10^3 ton Sb_{eq} (54.19%), respectivamente.

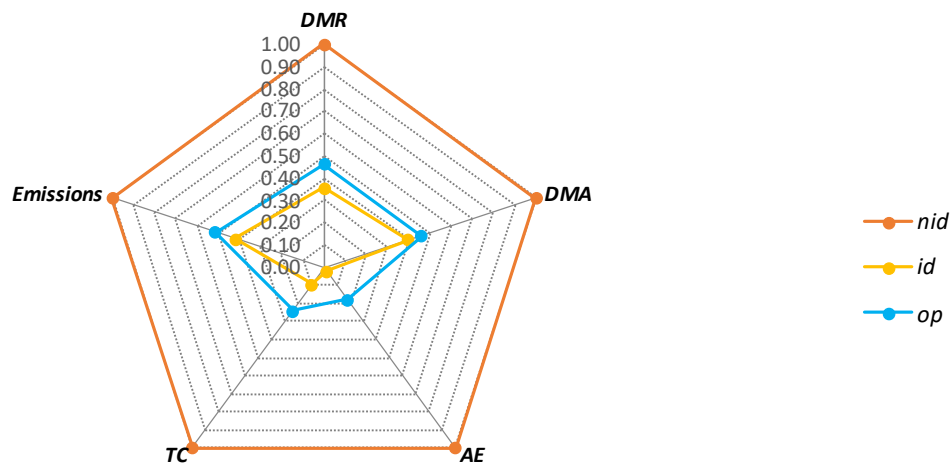


Figura 4. 1. Objetivos económicos y ambientales según las métricas de EC (tomada de Serrano-Arévalo et al., 2024a).

La **Figura 4.3** muestra los valores alcanzados respecto a lo esperado, es decir, la proporción en la que los valores *op* se acercan a los deseados (*id*), resaltando los objetivos

económicos, ambientales y de EC analizados, con el propósito de especificar cuál es el logro alcanzado para cada uno de ellos cuando la optimización multi-objetivo es aplicada. Asimismo, el “logro en el desempeño” en cada una de las funciones es calculado como la proporción alcanzada del valor *op* y *id* respecto a la diferencia de los valores *nid* y *id*. Los “logros en el desempeño” para los distintos objetivos oscilan entre un 84.00% y un 89.96%, con lo que se demuestra que los valores obtenidos de forma multi-objetivo tienen beneficios importantes respecto a las soluciones no deseadas (*nid*) y resultan muy cercanos a los deseados (*id*). Lo anterior demuestra que la técnica de programación compromiso puede lograr un equilibrio económico, ambiental y circular multi-objetivo, además se demuestra la importancia de aplicar indicadores de EC dentro del sector energético debido al alto impacto en requerimientos materiales utilizados durante la producción de energía, además la necesidad de aprovechar los recursos al máximo con la autosuficiencia energética da como resultado menor uso de requerimientos materiales, menores costos y efectos ambientales. Los indicadores de EC muestran cambios importantes cuando son aplicados, impactando a los costos y emisiones que convencionalmente son estudiados. Asimismo, se destaca la importancia de que el sistema opte por la combinación óptima de equipos que represente el menor consumo de recursos no renovables, reduciendo la carga ambiental, sin dejar de lado la satisfacción de la demanda energética.

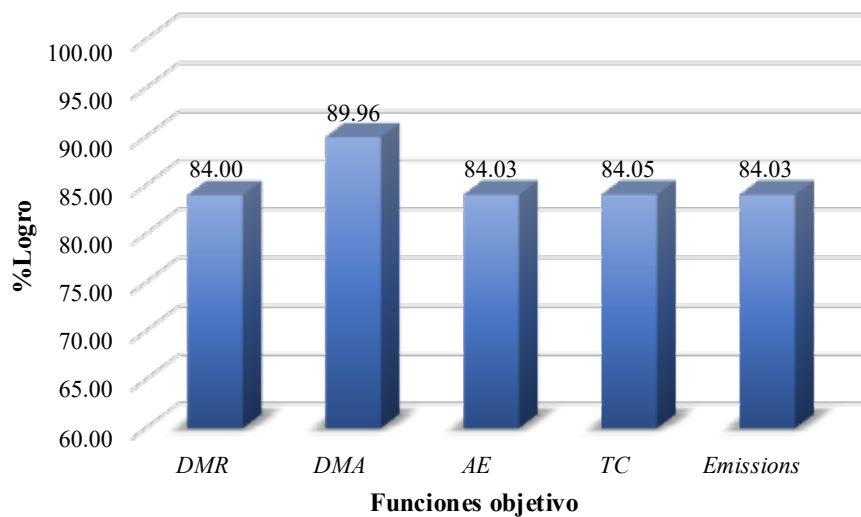


Figura 4. 2. Logro en el desempeño de los objetivos económicos y ambientales (tomada de Serrano-Arévalo et al., 2024a).

También es importante resaltar que respecto al estudio de la EC en tecnologías renovables tiene impactos de 62.32×10^{-1} ton Sb_{eq} / MW, 2.344×10^{-1} ton Sb_{eq} / MW, y 5.236×10^{-1} ton Sb_{eq} / MW para el uso de tecnologías eólica, solar e hidroeléctrica, respectivamente (como se puede ver en la **Tabla 4. 3**); en donde es evidente que los requerimientos materiales con mayor impacto se encuentran dados por las tecnologías eólicas y las de menor impacto para las tecnologías solares. Además, cabe destacar que el sistema opta por utilizar el conjunto de equipos que representan la menor carga ambiental en el consumo de recursos no renovables, sin dejar de lado que son necesarios para satisfacer el sistema energético. Es evidente que, con la incorporación de indicadores de EC, el sistema es selectivo en los equipos que representan el menor consumo de recursos, por lo que opta principalmente por la instalación de baterías (Li-Ion) y tecnologías solares renovables. En contraste, de acuerdo a la literatura existente y a uno de los métodos del análisis de ciclo de vida más importantes referido al Eco-Indicador 99, los impactos totales (considerando las categorías de salud humana, calidad del ecosistema y recursos) son de 3.23×10^6 Pt, 1.87×10^5 Pt y 3.54×10^4 Pt para las tecnologías eólica, solar e hidroeléctrica, respectivamente (Serrano Arévalo et al., 2024b). En este caso, las tecnologías eólicas nuevamente tienen el mayor impacto, mientras que las hidroeléctricas tienen el menor. Cabe destacar que ambos cuantificadores muestran el mayor impacto en las tecnologías eólicas. Sin embargo, la EC cuantifica el impacto de los recursos no renovables asociados a la infraestructura de un sistema en la fase de diseño, mientras que el Eco-Indicador 99 considera las repercusiones ambientales asociadas al ciclo de vida, incluidas las fases de diseño y desmantelamiento. Esta diferencia es particularmente evidente en la penalización de las tecnologías solares por parte del Eco-Indicador 99, principalmente debido a su importante impacto durante la etapa de desmantelamiento, mientras que la EC se centra únicamente en los materiales utilizados en la fabricación. Con lo anterior, este análisis revela una correlación entre las métricas de EC y el Eco-Indicador 99, destacando su dependencia de las etapas del proceso estudiado. Al analizar el Eco-Indicador 99 específicamente en la fase de fabricación, las métricas de EC pueden servir como herramientas para un análisis simplificado, proporcionando cuantificadores indirectos y aproximados del impacto ambiental en el análisis de ciclo de vida. Es importante reconocer que este análisis ofrece una visión general, destacando que el principal impacto en la producción de H_2 está determinado por el tipo de tecnología utilizada para la generación de energía eléctrica.

Capítulo V

5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado una formulación de programación matemática para la planificación óptima en la generación de energía eléctrica e hidrógeno verde considerando la descarbonización de un sistema macroscópico y la transmisión de energía de una región a otra, contemplando las demandas energéticas requeridas durante un periodo de tiempo. El modelo considera preocupaciones económicas y ambientales, introduciendo tres indicadores de economía circular: impacto material relativo (*DMR*), impacto material absoluto (*DMA*) e indicador de autosuficiencia energética (*AE*), estos indicadores permiten contabilizar requerimientos materiales de la infraestructura participante en el sistema y analizan la relación entre sistemas productores y consumidores especificando la autosuficiencia energética, además la cuantificación de materiales es normalizada por medio del ADP (Abiotic Depletion Potential) como un comparativo del agotamiento de los recursos no renovables. La técnica de programación compromiso ha sido aplicada con la finalidad de realizar una optimización multi-objetivo, en donde considera un peso relativo igual para cada una de las funciones objetivo, permitiendo minimizar el costo total (*TC*) (que considera costos de transmisión de energía eléctrica, costos de operación y capital), emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ (relacionadas con la producción de energía en las diferentes tecnologías generadoras de energía) e indicadores de economía circular. El modelo permite determinar la instalación y capacidades de la infraestructura requerida en el modelo de producción energética (tecnologías renovables; baterías, electrolizadores y almacenadores de H_2). Se presenta un caso de estudio en México, específicamente en la región de control peninsular la cual requiere satisfacer la demanda energética en cada una de sus regiones de transmisión (Grijalva, Tabasco, Campeche, Mérida, Chetumal, Cancún y Cozumel), en donde para aplicar la técnica de programación compromiso los valores máximos (no ideales) y mínimos (ideales) de las funciones objetivo son requeridos y los resultados muestran que al implementar indicadores de economía circular como un adicional a las funciones económicas y ambientales “los logros en el desempeño” para los distintos objetivos, oscilan entre un 84.00% y un 89.96%, con lo que los resultados apoyan que los valores obtenidos tienen beneficios importantes respecto a las

soluciones no deseadas (no ideales) y resultan muy cercanas a las deseadas (ideales), logrando un equilibrio económico y ambiental multi-objetivo. Además, la optimización muestra una gran disminución respecto a los valores no deseados, en este sentido *TC* logra disminuir 76.17% desde US\$ 5.514×10^7 hasta US\$ 1.314×10^7 , las emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ logran una disminución de 2.109×10^5 ton $\text{CO}_{2\text{eq}}$ (48.73%); además, *DMR*, *AE* y *DMA* disminuyen 4.200×10^{-3} ton Sb_{eq} / MWh (53.85%), 6.018×10^2 (82.18%) y 8.036×10^3 ton Sb_{eq} (54.19%), respectivamente.

Respecto a la economía circular, se desarrollaron nuevos indicadores que cuantifican el agotamiento de recursos no renovables, dando información clave para la fase de diseño de sistemas energéticos, en este sentido, los resultados muestran que la incorporación de indicadores de economía circular permite diferenciar de manera clara el desempeño ambiental de las tecnologías renovables desde la fase de diseño, evidenciando una mayor carga asociada a las tecnologías eólicas y una menor a las solares. Asimismo, el sistema tiende a seleccionar configuraciones con menor consumo de recursos no renovables, priorizando tecnologías solares y el uso de baterías (Li-Ion) para satisfacer la demanda energética. La comparación con el Eco-Indicador 99 revela una coherencia general en la identificación de las tecnologías con mayor y menor impacto, aunque también pone de manifiesto diferencias derivadas del alcance metodológico de cada enfoque. Mientras que la economía circular se centra en los materiales empleados en la fabricación, el Eco-Indicador 99 integra los efectos generados en el ciclo de vida, lo que explica, en particular, la mayor penalización de las tecnologías solares en este último. En este sentido, las métricas de economía circular pueden considerarse herramientas complementarias que permiten aproximar, de forma simplificada, ciertos impactos ambientales del análisis de ciclo de vida, confirmando que el principal factor que condiciona el impacto ambiental en la producción de H_2 es la tecnología empleada para la generación de energía eléctrica.

Los resultados indican que todas las regiones participantes interaccionan entre sí, con la finalidad de cumplir con los requerimientos de demanda energética. Los resultados destacan los beneficios al aplicar la metodología propuesta. Implementar indicadores de economía circular es decisivo en el sector energético, reduciendo el agotamiento de los recursos no renovables. Finalmente, el modelo propuesto es una estrategia que busca proporcionar opciones factibles para

ayudar a los tomadores de decisiones de acuerdo a los objetivos deseados. Por otro lado, el análisis del efecto de la asignación de pesos relativos constituye una brecha de investigación que puede abordarse en estudios futuros, incorporando de manera integral aspectos económicos, ambientales y de economía circular. Asimismo, podría considerarse el estudio de las distintas fases del proceso, y no únicamente la etapa de diseño. Sin embargo, el objetivo del trabajo es la incorporación de novedosos indicadores de economía circular en el sector energético. Con base en el análisis y los resultados obtenidos, se acepta la hipótesis planteada, al demostrarse que la metodología propuesta permite identificar el diseño óptimo de la red de producción de hidrógeno verde, contribuyendo a la descarbonización del sector energético y al fomento de la economía circular, además de cumplir con objetivos económicos y ambientales.

ANEXOS

Anexo A. Artículos y libros publicados

2020

Process Integration and Optimization for Sustainability
<https://doi.org/10.1007/s41660-020-00125-8>

ORIGINAL RESEARCH PAPER



Optimal Planning for Satisfying Future Electricity Demands Involving Simultaneously Economic, Emissions, and Water Concerns

Tania Itzel Serrano-Arévalo¹ • Maricruz Juárez-García¹ • José María Ponce-Ortega¹

Received: 17 April 2020 / Revised: 1 June 2020 / Accepted: 3 July 2020
© Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020

2022



pubs.acs.org/journal/ascecg

Research Article

Strategic Planning for Optimal Management of Different Types of Shale Gas Wastewater

Tania Itzel Serrano-Areválo, Luis Fernando Lira-Barragán, Mahmoud M. El-Halwagi, and José María Ponce-Ortega*



Cite This: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c06610>



Read Online

2023



Article

Optimal Incorporation of Intermittent Renewable Energy Storage Units and Green Hydrogen Production in the Electrical Sector

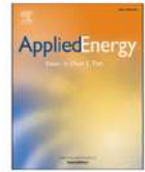
Tania Itzel Serrano-Arévalo¹, Javier Tovar-Facio² and José María Ponce-Ortega^{1,*}

Applied Energy 348 (2023) 121597



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy

Optimal expansion for a clean power sector transition in Mexico based on predicted electricity demand using deep learning scheme

Tania Itzel Serrano-Arévalo, Francisco Javier López-Flores*, Alma Yunuen Raya-Tapia, César Ramírez-Márquez, José María Ponce-Ortega

¿Por qué preocupa el gas shale?

Escrito por Tania Itzel Serrano-Arévalo y José María Ponce-Ortega



Transición energética sostenible: Un reto en la actualidad

Escrito por Tania Itzel Serrano-Arévalo y José María Ponce-Ortega



2024

Sustainable Production and Consumption 44 (2024) 234–249



Contents lists available at ScienceDirect

Sustainable Production and Consumptionjournal homepage: www.elsevier.com/locate/spc**The impact of circular economy indicators in the optimal planning of energy systems**Tania Itzel Serrano-Arévalo^a, Felipe A. Díaz-Alvarado^{b,*}, Javier Tovar-Facio^c,
José María Ponce-Ortega^a**ACS**
Sustainable
Chemistry & Engineeringpubs.acs.org/journal/ascecg

Research Article

Green Ammonia Production: The Performance of Global Systems in Eco-Indicator 99 and Circular Economy MetricsTania Itzel Serrano-Arévalo, Carlos Antonio Padilla-Esquivel, Luis Germán Hernández-Pérez,
Felipe A. Díaz-Alvarado, César Ramírez-Márquez, and José María Ponce-Ortega*

Journal of Cleaner Production 442 (2024) 141017



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Productionjournal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro**Sustainable lime production in Michoacan Mexico: An optimal and equitable approach with machine learning**

Rogelio Ochoa-Barragán, Tania Itzel Serrano-Arévalo, Juan Carlos Pulido-Ocegueda, Sandra Cecilia Cerda-Flores, César Ramírez-Márquez*, Fabricio Nápoles-Rivera, José María Ponce-Ortega



2025

Article

Analysis of Process Intensification Impact on Circular Economy in Levulinic Acid Purification Schemes

Tania Itzel Serrano-Arévalo ¹, Heriberto Alcocer-García ^{*}, César Ramírez-Márquez ,
and José María Ponce-Ortega ^{*}



Review

Energy Storage: From Fundamental Principles to Industrial Applications

Tania Itzel Serrano-Arévalo ¹, Rogelio Ochoa-Barragán ¹, César Ramírez-Márquez ^{1,*}, Mahmoud El-Halwagi ²,
Nabil Abdel Jabbar ³ and José María Ponce-Ortega ^{1,*}



pubs.acs.org/IECR

Article

Impact of Circular Economy Indicators on the Lithium Supply Chain: A Case Study in Mexico

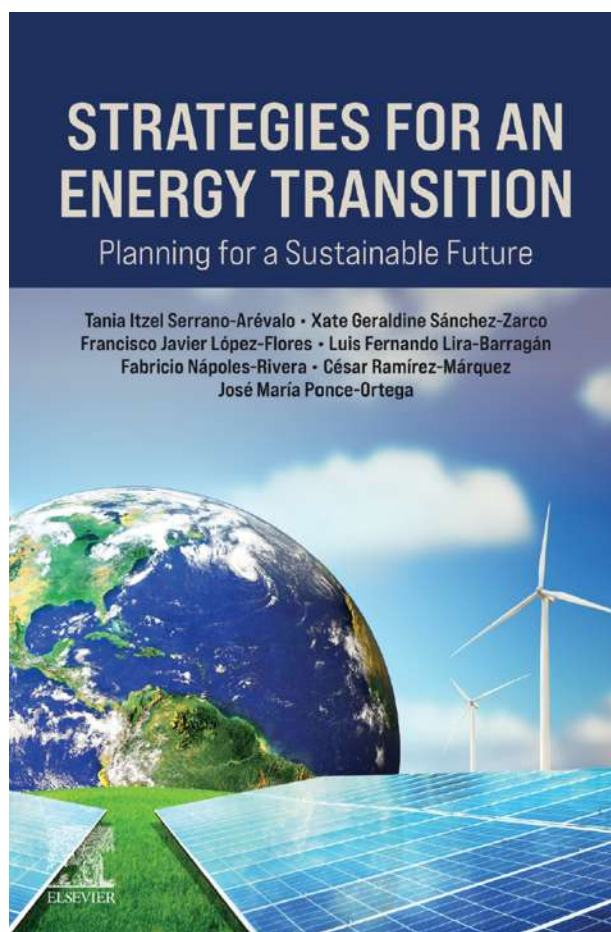
Published as part of Industrial & Engineering Chemistry Research special issue "Advances in Circularity".

Victor Osvaldo Vega-Muratalla, Tania Itzel Serrano-Arévalo, César Ramírez-Márquez,
Luis Fernando Lira-Barragán, and José María Ponce-Ortega^{*}

Recent Advances and Engineering Challenges of Lithium Batteries for Grid-Level Energy Storage: A Review

Published as part of Industrial & Engineering Chemistry Research special issue "Energy Storage across Scales".

Victor Osvaldo Vega-Muratalla, Tania Itzel Serrano-Arévalo, Rogelio Ochoa-Barragán, Luis Fernando Lira-Barragán, César Ramírez-Márquez, Mahmoud M. El-Halwagi, and José María Ponce-Ortega*



Anexo B. Reconocimientos obtenidos

2021



2025

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdin, Z.; Zafaranloo, A.; Rafiee, A.; Mérida, W.; Lipiński, W.; Khalilpour, K. R. Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2020**, *120*, 109620. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620>

Afgan, N. H.; Carvalho, M. G.; Hovanov, N. V. Energy system assessment with sustainability indicators. *Energy policy*. **2000**, *28*(9), 603-612. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00045-8](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00045-8)

Al-Shahri, O.A.; Ismail, F.B.; Hannan, M.A.; Lipu, M.S.H.; Al-Shetwi, A.Q.; Begum, R.A.; Al-Muhsen, N.F.O.; Soujeri, E. Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. **2021**, *284*, 125465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125465>

ARA. *Récord de emisiones por el aumento de la demanda de combustibles fósiles*. **2024**. https://es.ara.cat/economia/energia/record-emisiones-aumento-demanda-combustibles-fosiles_1_5066722.html

Barros, M. V.; Salvador, R.; de Francisco, A. C.; Piekarski, C. M. Mapping of research lines on circular economy practices in agriculture: From waste to energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2020**, *131*, 109958. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109958>

Bartels, J. R.; Pate, M. B.; Olson, N. K. An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, **2010**, *35*(16), 8371-8384. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.035>

Bhattacharyya, R.; Misra, A.; Sandeep, K.C. Photovoltaic solar energy conversion for hydrogen production by alkaline water electrolysis: Conceptual design and analysis. *Energy Conversion and Management*, **2017**, *133*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.057>

Bocken, N. M.; De Pauw, I.; Bakker, C.; Van Der Grinten, B. Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, **2016**, *33*(5), 308-320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>

Bressanelli, G.; Perona, M.; Saccani, N. Challenges in supply chain redesign for the Circular Economy: a literature review and a multiple case study. *International Journal of*

Production Research, **2019**, 57(23), 7395-7422.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1542176>

Bressanelli, G.; Pigosso, D. C.; Saccani, N.; Perona, M. Enablers, levers and benefits of Circular Economy in the Electrical and Electronic Equipment supply chain: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, **2021**, 298, 126819.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126819>

Castro, C.G.; Trevisan, A.H.; Pigosso, D.C.; Mascarenhas, J. The rebound effect of circular economy: definitions, mechanisms and a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, **2022**, 345, 131136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131136>

Chen, T.; Jin, Y.; Lv, H.; Yang, A.; Liu, M.; Chen, B.; Xie, Y.; Chen, Q. Applications of lithium-ion batteries in grid-scale energy storage systems. *Transactions of Tianjin University*, **2020**, 26, 208–217. <https://doi.org/10.1007/s12209-020-00236-w>

Chi, J.; Yu, H. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*, **2018**, 39(3), 390–394. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)

Corvellec, H.; Stowell, A. F.; Johansson, N. Critiques of the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, **2022**, 26(2), 421-432. <https://doi.org/10.1111/jiec.13187>

Curran, M.A. Life cycle assessment: a review of the methodology and its application to sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering*. **2013**, 2(3), 273–277. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2013.02.002>

da Silva Lima, L.; Quartier, M.; Buchmayr, A.; Sanjuan-Delmás, D.; Laget, H.; Corbisier, D.; Mertens, J.; Dewulf, J. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **2021**, 46, 101286. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101286>

Dawood, F.; Anda, M.; Shafiullah, G.M. Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, **2020**, 45, 3847–3869.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>

De Sisternes Jimenez, F.; Webster, M.D. Optimal Selection of Sample Weeks for Approximating the Net Load in Generation Planning Problems; Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, MA, USA, **2013**.

<https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/102959/esd-wp-2013-03.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Dhakouani, A.; Znouda, E.; Bouden, C. Impacts of energy efficiency policies on the integration of renewable energy. *Energy Policy*, **2019**, *133*, 110922. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110922>

Di Maio, F.; Rem, P. C. A robust indicator for promoting circular economy through recycling. *Journal of Environmental Protection*, **2015**, *6*(10), 1095. <https://doi.org/10.4236/jep.2015.610096>

Ding, S.; Zhang, M.; Song, Y. Exploring China's carbon emissions peak for different carbon tax scenarios. *Energy Policy*, **2019**, *129*, 1245–1252. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.037>

Ellen MacArthur Foundation. *Circularity indicators: An approach to measuring circularity. Methodology*. **2015**. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator>

Esposito, D.V. Membraneless electrolyzers for low-cost hydrogen production in a renewable energy future. *Joule*. **2017**, *1*, 651–658. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.003>

Evans, A.; Strezov, V.; Evans, T. J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*. **2009**, *13*(5), 1082–1088. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>

Feng, Z.K.; Niu, W.J.; Cheng, C.T. Optimizing electrical power production of hydropower system by uniform progressive optimality algorithm based on two-stage search mechanism and uniform design. *Journal of Cleaner Production*. **2018**, *190*, 432–442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.134>

Franklin-Johnson, E.; Figge, F.; Canning, L. Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance. *Journal of Cleaner Production*. **2016**, *133*, 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.023>

Geissdoerfer, M.; Savaget, P.; Bocken, N. M.; Hultink, E. J. The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. *Journal of Cleaner Production*. **2017**, *143*, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Giannakitsidou, O.; Giannikos, I.; Chondrou, A. Ranking European countries on the basis of their environmental and circular economy performance: A DEA application in MSW. *Waste Management*. **2020**, *109*, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.055>

Gielen, D.; Boshell, F.; Saygin, D.; Bazilian, M. D.; Wagner, N.; Gorini, R. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*. **2019**, *24*, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>

Hu, D.; Ryan, S.M. Stochastic vs. deterministic scheduling of a combined natural gas and power system with uncertain wind energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. **2019**, *108*, 303–313. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.12.047>

Iberdrola. (s.f.). *Central hidroeléctrica de bombeo*. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/central-hidroelectrica-bombeo>

İlbaş, M.; Karyeyen, S. A numerical study on combustion behaviours of hydrogen-enriched low calorific value coal gases. *International Journal of Hydrogen Energy*. **2015**, *40*(44), 15218–15226. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.141>

International Energy Agency (IEA). *Global Hydrogen Review 2023*. **2023**. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>

Islam, M. M.; Irfan, M.; Shahbaz, M.; Vo, X. V. Renewable and non-renewable energy consumption in Bangladesh: The relative influencing profiles of economic factors, urbanization, physical infrastructure and institutional quality. *Renewable Energy*, **2022**, *184*, 1130-1149. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.020>

Johnsson, F.; Kjärstad, J.; Rootzén, J. The threat to climate change mitigation posed by the abundance of fossil fuels. *Climate Policy*. **2019**, *19*(2), 258-274. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1483885>

Kakwani, N. S.; Kalbar, P. P. Review of Circular Economy in urban water sector: Challenges and opportunities in India. *Journal of Environmental Management*. **2020**, *271*, 111010. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111010>

Karayel, G.K.; Javani, N.; Dincer, I. Green hydrogen production potential for Turkey with solar energy. *International Journal of Hydrogen Energy*. **2022**, *47*, 19354–19364. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.240>

Kavadias, K.A.; Kosmas, V.; Tzelepis, S. Sizing, optimization, and financial analysis of a green hydrogen refueling station in remote regions. *Energies*. **2022**, *15*, 547. <https://doi.org/10.3390/en15020547>

Kojima, H.; Nagasawa, K.; Todoroki, N.; Ito, Y.; Matsui, T.; Nakajima, R. Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. **2023**, *48*, 4572–4593. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.018>

Koohi-Fayegh, S.; Rosen, M.A. A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, **2020**, *27*, 101047. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>

Labra-Marín, D.; Rayas-Amor, A. A.; Herrera-Hernández, E. C.; Martínez-García, C. G.; García-Martínez, A.; Núñez-López, M. La optimización como herramienta para la toma de decisiones en sistemas agropecuarios en pequeña escala. *AGROProductividad*. **2018**, *11*(11). <https://link.gale.com/apps/doc/A569456114/IFME?u=anon~e43e9433&sid=googleScholar&xid=a7af4df1>

Lazarevic, D.; Valve, H. Narrating expectations for the circular economy: Towards a common and contested European transition. *Energy Research & Social Science*. **2017**, *31*, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.05.006>

Legal Information Institute – Cornell Law School. (s. f.). *Clean energy*. https://www.law.cornell.edu/wex/clean_energy

Li, L.; Manier, H.; Manier, M. A. Hydrogen supply chain network design: An optimization-oriented review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2019**, *103*, 342–360. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.060>

Liu, Y.; Du, J.L. A multi criteria decision support framework for renewable energy storage technology selection. *Journal of Cleaner Production*. **2020**, *277*, 122183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122183>

Maggio, G.; Nicita, A.; Squadrito, G. How the hydrogen production from RES could change energy and fuel markets: A review of recent literature. *International Journal of Hydrogen Energy*. **2019**, *44*, 11371–11384. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.121>

MahmoumGonbadi, A.; Genovese, A.; Sgalambro, A. Closed-loop supply chain design for the transition towards a circular economy: A systematic literature review of methods,

applications and current gaps. *Journal of Cleaner Production*. **2021**, 323, 129101. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129101>

Martín, M.; Grossmann, I. E. Energy optimization of hydrogen production from lignocellulosic biomass. *Computers & Chemical Engineering*. **2011**, 35(9), 1798-1806. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.03.002>

Martín, M.; Grossmann, I. E. Optimal simultaneous production of hydrogen and liquid fuels from glycerol: integrating the use of biodiesel byproducts. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. **2014**, 53(18), 7730-7745. <https://doi.org/10.1021/ie500067d>

Martins, F.; Felgueiras, C.; Smitkova, M.; Caetano, N. Analysis of fossil fuel energy consumption and environmental impacts in European countries. *Energies*. **2019**, 12 (6), 964. <https://doi.org/10.3390/en12060964>

Megía, P.J.; Vizcaíno, A.J.; Calles, J.A.; Carrero, A. Hydrogen production technologies: From fossil fuels toward renewable sources. A mini review. *Energy Fuels*. **2021**, 35, 16403–16415. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>

Mies, A.; Gold, S. Mapping the social dimension of the circular economy. *Journal of Cleaner Production*. **2021**, 321, 128960. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128960>

Moelling, D. S.; Femiana, E.; Burns, D. K. Flexible Use of Hydrogen Fueled Duct Burners in Combined Cycle Power Plant HRSGs. *Proceedings of the ASME 2022 Power Conference*; American Society of Mechanical Engineers: Pittsburgh, PA, USA, **2022**; Paper No. V001T02A001. <https://doi.org/10.1115/POWER2022-81967>

Moretti, L.; Astolfi, M.; Vergara, C.; Macchi, E.; Pérez-Arriaga, J.I.; Manzolini, G. A design and dispatch optimization algorithm based on mixed integer linear programming for rural electrification. *Applied Energy*. **2019**, 233, 1104–1121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.194>

Namahoro, J.P.; Wu, Q.; Zhou, N.; Xue, S. Impact of energy intensity, renewable energy, and economic growth on CO₂ emissions: Evidence from Africa across regions and income levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2021**, 147, 111233. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111233>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). *Energy Storage at utility scale as an enabler for CO₂ mitigation; Appendix A: Technology Roadmap and Mitigation Potential of Utility-Scale Electricity Storage in Mexico*. INECC, **Oct. 2020**.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/590013/32_D5.3_Appendix__A_INGLES_CGMCC.pdf

Öberg, S.; Odenberger, M.; Johnsson, F. The value of flexible fuel mixing in hydrogen-fueled gas turbines—A techno-economic study. *International Journal of Hydrogen Energy*. **2022**, 47(74), 31684–31702. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.075>

Osorio, L. L. D. R.; Flórez-López, E.; Grande-Tovar, C. D. The potential of selected agri-food loss and waste to contribute to a circular economy: Applications in the food, cosmetic and pharmaceutical industries. *Molecules*. **2021**, 26(2), 515. <https://doi.org/10.3390/molecules26020515>

Praveenkumar, S.; Agyekum, E.B.; Ampah, J.D.; Afrane, S.; Velkin, V.I.; Mehmood, U.; Awosusi, A. A. Techno-economic optimization of PV system for hydrogen production and electric vehicle charging stations under five different climatic conditions in India. *International Journal of Hydrogen Energy*. **2022**, 47(90), 38087–38105. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.015>

Praveenkumar, S.; Agyekum, E.B.; Kumar, A.; Velkin, V.I. Thermo-enviro-economic analysis of solar photovoltaic/thermal system incorporated with u-shaped grid copper pipe, thermal electric generators and nanofluids: An experimental investigation. *Journal of Energy Storage*. **2023a**, 60, 106611. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106611>

Praveenkumar, S.; Agyekum, E.B.; Kumar, A.; Velkin, V.I. Performance evaluation with low-cost aluminum reflectors and phase change material integrated to solar PV modules using natural air convection: An experimental investigation. *Energy*. **2023b**, 266, 126415. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126415>

Preuster, P.; Alekseev, A.; Wasserscheid, P. Hydrogen Storage Technologies for Future Energy Systems. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. **2017**, 8, 445–471. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060816-101334>

Prieto, C.; Sánchez, A.; Martín, M. Liquid organic hydrogen carriers (LOHC) as a solution for the energy transition: a reactor design assessment. *Computer Aided Chemical Engineering*. **2023**, 52, 2873-2878. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50457-1>

Razmjoo, A.; Kaigutha, L.G.; Rad, M.V.; Marzband, M.; Davarpanah, A.; Denai, M. A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy

sources to reduce CO₂ emissions in a high potential area. *Renewable Energy*. **2021**, *164*, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.042>

Reddy, K. S.; Panwar, L. K.; Kumar, R.; Panigrahi, B. K. Profit-based conventional resource scheduling with renewable energy penetration. *International Journal of Sustainable Energy*. **2015**, *36*(7), 619–636. <https://doi.org/10.1080/14786451.2015.1069293>

Renner, S. Poverty and distributional effects of a carbon tax in Mexico. *Energy Policy*. **2018**, *112*, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.011>

Rezaei, M.; Akimov, A.; Gray, E.M. Economics of solar-based hydrogen production: Sensitivity to financial and technical factors. *International Journal of Hydrogen Energy*. **2022**, *47*, 27930–27943. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.116>

Rivard, E.; Trudeau, M.; Zaghib, K. Hydrogen storage for mobility: A review. *Materials*. **2019**, *12*(12), 1973. <https://doi.org/10.3390/ma12121973>

Roychand, R.; Pramanik, B. K.; Zhang, G.; Setunge, S. Recycling steel slag from municipal wastewater treatment plants into concrete applications—A step towards circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*. **2020**, *152*, 104533. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104533>

Secretaría de Energía de México (SENER). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018–2032 “PRODESEN”*. **2018**. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>

Serrano-Arévalo, T. I.; Díaz-Alvarado, F. A.; Tovar-Facio, J.; Ponce-Ortega, J. M. The impact of circular economy indicators in the optimal planning of energy systems. *Sustainable Production and Consumption*. **2024a**, *44*, 234–249. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.12.018>

Serrano-Arevalo, T. I.; Padilla-Esquível, C. A.; Hernández-Pérez, L. G.; Díaz-Alvarado, F. A.; Ramírez-Marquez, C.; Ponce-Ortega, J. M. Green ammonia production: the performance of global systems in eco-indicator 99 and circular economy metrics. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. **2024b**, *12*(33), 12652–12669. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c05181>

Serrano-Arévalo, T. I.; Juárez-García, M.; Ponce-Ortega, J. M. Optimal planning for satisfying future electricity demands involving simultaneously economic, emissions, and

water concerns. *Process Integration and Optimization for Sustainability*. **2020**, 4(4), 379-389. <https://doi.org/10.1007/s41660-020-00125-8>

Serrano-Arévalo, T. I.; Tovar-Facio, J.; Ponce-Ortega, J. M. Optimal incorporation of intermittent renewable energy storage units and green hydrogen production in the electrical sector. *Energies*. **2023**, 16(6), 2609. <https://doi.org/10.3390/en16062609>

Smol, M.; Kulczycka, J.; Avdiushchenko, A. Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions. *Clean Technologies and Environmental Policy*. **2017**, 19, 669-678. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1323-8>

Sudusinghe, J. I.; Seuring, S. Supply chain collaboration and sustainability performance in circular economy: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*. **2022**, 245, 108402. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108402>

Tan, K.M.; Babu, T.S.; Ramachandaramurthy, V.K.; Kasinathan, P.; Solanki, S.G.; Raveendran, S.K. Empowering smart grid: A comprehensive review of energy storage technology and application with renewable energy integration. *Journal of Energy Storage*. **2021**, 39, 102591. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102591>

Tavakkoli, S.; Macknick, J.; Heath, G. A.; Jordaan, S. M. Spatiotemporal energy infrastructure datasets for the United States: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **2021**, 152, 111616. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111616>

Tong, D.; Zhang, Q.; Zheng, Y.; Caldeira, K.; Shearer, C.; Hong, C.; Qin, Y.; Davis, S. J. Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 C climate target. *Nature*. **2019**, 572(7769), 373-377. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1364-3>

Tovar-Facio, J.; Guerras, L.S.; Ponce-Ortega, J.M.; Martin, M. Sustainable energy transition considering the water–energy nexus: A multiobjective optimization framework. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. **2021**, 9, 3768–3780. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08694>

van den Broek, R.; van den Burg, T.; van Wijk, A.; Turkenburg, W. Electricity generation from eucalyptus and bagasse by sugar mills in Nicaragua: A comparison with fuel oil electricity generation on the basis of costs, macro-economic impacts and environmental emissions. *Biomass Bioenergy*. **2000**, 19(5), 311–335. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00034-9)

van Oers, L.; Guinée, J. B.; Heijungs, R. Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for

production data. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. **2020**, 25, 294-308. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01683-x>

Velvizhi, G.; Shanthakumar, S.; Das, B.; Pugazhendhi, A.; Priya, T. S.; Ashok, B.; Nanthagopal, K.; Vignesh, R.; Karthick, C. Biodegradable and non-biodegradable fraction of municipal solid waste for multifaceted applications through a closed loop integrated refinery platform: Paving a path towards circular economy. *Science of the Total Environment*. **2020**, 731, 138049. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138049>

Wang, S.; Lu, A.; Zhong, C.J. Hydrogen production from water electrolysis: Role of catalysts. *Nano Convergence*. **2021**, 8, 4. <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00254-x>

Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. **2016**, 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

Yuyin, Y.; Jinxi, L. The effect of governmental policies of carbon taxes and energy-saving subsidies on enterprise decisions in a two-echelon supply chain. *Journal of Cleaner Production*. **2018**, 181, 675–691. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.188>

Zelany, M. A concept of compromise solutions and the method of the displaced ideal. *Computers & Operations Research*. **1974**, 1(3), 479–496. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(74\)90064-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(74)90064-1)

Tania Itzel Serrano Arévalo

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA DESCARBONIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:556107837

Fecha de entrega

12 feb 2026, 8:05 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

12 feb 2026, 8:11 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA DESCARBONIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE D....pdf

Tamaño del archivo

12.5 MB

88 páginas

23.490 palabras

137.041 caracteres

16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 15%  Fuentes de Internet
- 13%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
69 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Doctorado en ciencias en ingeniería química	
Título del trabajo	Planificación estratégica para la descarbonización en la producción sostenible de hidrógeno verde con un enfoque de economía circular	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Tania Itzel Serrano Arévalo	1129300h@umich.mx
Director	José María Ponce Ortega	jose.ponce.umich.mx
Codirector	Javier Tovar Fucio	jtovarf@uach.mx
Coordinador del programa	Javier Lara Romero	lararom@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	no	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	no	
Traducción a otra lengua	no	
Revisión y corrección de estilo	no	
Análisis de datos	no	
Búsqueda y organización de información	no	
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro	no	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 11 de febrero del 2026