

GUIA PARA LA ELABORACION DE PROYECTOS QUE REQUIEREN FINANCIACIÓN

Título del proyecto: Planeamiento óptimo integrado de sistemas de Energía-Agua-Carbono para el desarrollo sostenible de comunidades

Tipo: Investigación básica _ Investigación aplicada ☒ Desarrollo experimental _ Proyectos de Investigación-Creación _

Línea de la convocatoria: 1 **Monto solicitado:** 50 SMMLV

CONTENIDO DEL PROYECTO

1. RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se propone una metodología de planeamiento óptimo integrado de sistemas de producción de agua y energía con restricciones de carbono (emisiones de CO₂ de generadores de energía eléctrica). Estos sistemas relacionados entre sí se conocen en la literatura especializada como sistemas de nexo Energía-Agua-Carbono cuyo objetivo final es el suministro fiable de la energía eléctrica y el agua potable demandados por una comunidad, teniendo en cuenta la interrelación entre ambos sistemas y las emisiones de CO₂. Por otro lado, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) estableció en 2015 un conjunto de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos, donde el ODS 6 está relacionado con el acceso a agua limpia y saneamiento, el ODS 7 está relacionado con el acceso a energía no contaminante y el ODS 13 está relacionado con el cambio climático. Dentro de este contexto, en Colombia existen varios territorios que poseen problemas relacionados al acceso al agua y la energía, por lo que un planeamiento óptimo integrado de sistemas de Energía-Agua-Carbono ayudaría a cumplir los ODS 6, 7 y 13 propuestos por la ONU en aquellas comunidades que tengan problemas de este tipo, mejorando sus condiciones de vida.

La metodología de planeamiento propuesta en este proyecto considera sistemas de producción de energía eólica, fotovoltaica y diésel; adicionalmente, tiene en cuenta la instalación de sistemas de baterías para obtener un manejo óptimo entre la energía generada y la demanda. La producción de agua se basa en la desalinización de agua de mar. La interacción entre ambos sistemas (producción de energía y agua) y las emisiones de carbono se modela como un único sistema para considerar el efecto entre ellos. En la formulación de este modelo se involucra el diseño de la red eléctrica (ubicación y capacidad de elementos) y la incertidumbre de las demandas eléctricas y las fuentes de energía renovables, y para solucionarlo se emplearán programas especializados de optimización. Finalmente, se espera que los resultados obtenidos con este proyecto puedan brindar alternativas atractivas a los gobiernos locales y nacionales que permitan ayudar a cumplir los ODS 6, 7 y 13 en comunidades con condiciones precarias de vida, mediante el aprovechamiento óptimo de los recursos que se encuentren en su región.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1 Planteamiento de la pregunta o problema de investigación y su justificación en términos de necesidades y pertinencia

En el 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) adoptó 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para acabar con la pobreza, proteger el planeta y garantizar que en 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad [1]. Entre los 17 ODS, los ODS 6, 7 y 13 están relacionados al agua, la energía y el cambio climático, respectivamente. El ODS 6, denominado “Agua limpia y saneamiento”, tiene como objetivo garantizar la disponibilidad y el acceso a agua potable y de saneamiento; el ODS 7, denominado “Energía asequible y no contaminante”, tiene como objetivo garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos y el ODS 13, denominado “Acción por el clima” tiene como objetivo disminuir y generar conciencia sobre las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera [1].

En Colombia, una gran mayoría de los habitantes de territorios como el departamento de la Guajira tienen dificultades relacionadas a la calidad y el acceso de agua y energía [2], [3]. A pesar de esto, el departamento de la Guajira presenta bastante potencial relacionado a la penetración de energía eólica y solar, las cuales son energías no contaminantes que podrían ayudar a mejorar el acceso a la energía eléctrica. Adicionalmente, el departamento también tiene un gran potencial en el uso de plantas de desalinización de agua de mar para la producción de agua potable y limpia [4], [5]. No obstante, en la Guajira sigue siendo necesario considerar generación diésel para poder suplir la demanda en las horas en las que la generación solar y eólica no sean suficientes debido a su intermitencia y variabilidad [6], [7]. Por lo tanto, la emisión de gases invernadero es otro problema relacionado al acceso de la energía eléctrica en comunidades de la Guajira, lo cual va en contra del ODS 7.

Los sistemas de baterías pueden ser integrados junto con la generación eólica, solar y diésel para obtener un manejo óptimo de la generación y la demanda y de esta forma contribuir a la reducción de las emisiones de los generadores diésel; sin embargo, existen diversos problemas relacionados con su dimensionamiento y operación óptima [8], [9]. Además de esto, también existen diversos problemas relacionados a la desalinización del agua dado que parte de la energía generada también debe ser empleada en este proceso [10]. Por lo tanto, se puede observar que existe una relación entre la generación de energía, la producción de agua potable y las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto se puede llamar un sistema de nexo Energía-Agua-Carbono que representa la relación interna de cada uno de estos sectores entre sí lo cual genera diversos retos relacionados al planeamiento y operación óptima de los recursos de estos tres sectores [11]. Además del problema de planeamiento y operación del sistema de nexo Energía-Agua-Carbono, dentro de la red de energía eléctrica se tienen diferentes problemas relacionados al planeamiento como la ubicación y dimensionamiento óptimo de los generadores solares, eólicos y diésel, sistemas de baterías y conductores, con el fin de obtener una operación confiable, segura y óptima del sistema eléctrico (esto es, minimización de pérdidas de energía

eléctrica, perfiles de tensión dentro de los límites permitidos y un correcto abastecimiento de la demanda) [12].

Por lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible desarrollar una metodología robusta, eficiente y precisa que permita evaluar y obtener un plan de expansión óptimo de un sistema de nexo Energía-Agua-Carbono para una comunidad, considerando el diseño de la red eléctrica y la incertidumbre de las fuentes de energía renovables?

Con el fin de dar respuesta a esta pregunta, en este proyecto se propone una nueva metodología de planeamiento óptimo integrado de sistemas de Energía-Agua-Carbono cuyo objetivo final es el suministro fiable de la energía eléctrica y el agua potable demandados por una comunidad, teniendo en cuenta la interrelación entre ambos y las emisiones de CO₂. La metodología propuesta de planeamiento considera la producción de agua a partir de la desalinización de agua de mar, y la ubicación y dimensionamiento de sistemas de producción de energía eólica, fotovoltaica y diésel, sistemas de baterías y conductores para obtener un manejo eficiente de la energía y una operación óptima de la red. Además, se considera la incertidumbre en las fuentes de energía renovables.

Con la solución de este problema se proporciona una alternativa de desarrollo sostenible para comunidades con deficiencias en el servicio de agua y energía, garantizando condiciones de vida más dignas que sienten unas bases para un progreso de su región.

2.2 Marco teórico y estado del arte

2.2.1. Marco teórico

- **Sistemas de nexo Energía-Agua-Carbono**

Un sistema de nexo energía-agua-carbono básicamente busca representar las diferentes relaciones que existen entre procesos relacionados al agua, la energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (es decir, la cantidad de agua que puede ser necesaria para producir energía en plantas térmicas, la cantidad de energía usada en procesos relacionados al agua como la producción de agua potable o de saneamiento y las emisiones de gases invernadero que se puedan llegar a producir en la generación de energía o procesos relacionados al agua). Los sistemas de nexo de energía-agua-carbono pueden ser usados para analizar y optimizar los recursos de ciudades, regiones, universidades y comunidades, aunque también pueden ser usados para resolver problemas de comunidades que tengan problemas de acceso a energía y agua.

Un ejemplo de un sistema de nexo Energía-Agua-Carbono para una comunidad con problemas de acceso a energía y agua se ilustra en la Figura 1, donde se puede observar de una forma más gráfica la

interrelación entre la generación de energía, agua y emisiones de gases invernadero que puede tener el nexo de la comunidad. En la Figura 1 se puede observar que la comunidad tiene un sistema eléctrico el cual es una red híbrida de corriente alterna (AC bus) y corriente continua (DC bus); sin embargo, la red eléctrica podría ser solo AC o DC dependiendo del plan óptimo de expansión. Se puede notar que los paneles solares (PV), las turbinas de viento (WT), los generadores diésel (DG) y los sistemas de batería (BS) pueden ser instalados de forma distribuida en la red eléctrica (e incluso con diferentes capacidades). Se aprecia adicionalmente que estos sistemas de generación eléctrica deben alimentar las demandas de la comunidad, y la planta de desalinización de agua de mar (WD) junto a las bombas de carga y descarga (CP y DP) del depósito de agua (WS). Finalmente, se observa que el único elemento relacionado a la emisión de gases de efecto invernadero son los generadores diésel utilizados para suplir la demanda eléctrica que no pueda ser abastecida debido a la incertidumbre de las fuentes de energía renovables.

Figura 1. Sistemas de nexo Energía-Agua-Carbono. Fuente: Modificado de [11].

- **Formulación del problema**

El problema de planeamiento de un sistema de nexo Energía-Agua-Carbono es de gran importancia dado que debe ser capaz de suplir las demandas eléctricas de la comunidad y la demanda eléctrica de la producción de agua potable con el menor costo posible de inversión. Además, se deben controlar las emisiones de gases de efecto invernadero del sistema de nexo logrando un equilibrio entre la inversión y el medio ambiente. Para lograr esto, el problema de planeamiento debe ser formulado como un modelo matemático que represente una función objetivo de costos de inversión y operación del sistema de nexo junto con un conjunto de restricciones que represente el modelamiento de la planta de agua, las redes eléctricas de la comunidad y la interrelación entre los sistemas. Además, se debe considerar dentro del modelo matemático el problema de localización y dimensionamiento de los diferentes elementos de la

red eléctrica y la incertidumbre de las fuentes de energía renovables.

2.2.2. Estado del arte

2.2.2.1. Marco referencial

Las investigaciones relacionadas al planeamiento de sistemas de nexo energía-agua-carbono son comentadas a continuación. En [13], evaluaron el nexo que existe entre la energía, el agua y las emisiones de gases invernadero de los sectores urbanos de dos ciudades de China (Shanghái y Pekín). En ese estudio se estimó el consumo de energía, la utilización del agua y las emisiones de carbono de los sectores urbanos utilizando un modelo de entrada-salida medioambiental, en donde los autores propusieron algunas sugerencias de desarrollo sostenible basadas en los resultados. En [14], evaluaron un vínculo interregional entre diferentes regiones de China en el nexo energía-agua-carbono basado en un marco interactivo. En este trabajo se propuso un modelo de entrada-salida para determinar el uso del agua en la producción de energía, el uso de la energía en procesos relacionados al agua y las emisiones de carbono relacionadas con el agua desde un punto de vista basado en el consumo. En [15], se presentó una revisión del estado del arte de sistemas de nexo energía-agua-carbono. Primero, se investigó sobre la relación entre la energía y el agua y después se evaluaron los nexos de energía-carbono y agua-carbono. Por último, se revisó el nexo energía-agua-carbono para las comunidades urbanas. Según los resultados de este estudio, el nexo energía-agua ha sido el foco principal de las investigaciones con cerca del 94% de los estudios en el estado del arte. El estudio también demostró que se han realizado pocos estudios sobre la sinergia entre los tres aspectos del nexo. En [16] propusieron un modelo de entrada-salida ambiental para evaluar el nexo agua-energía-emisiones de carbono en China. Para ello, los autores evaluaron los consumos interrelacionados de agua y energía y las emisiones de carbono resultantes. Finalmente, este estudio determinó los coeficientes de consumo de agua y energía, y también los coeficientes de la emisión de CO₂. En [17] estudiaron el nexo entre el agua, la energía y el carbono para una planta de tratamiento de agua potable a gran escala. En consecuencia, se define el consumo energético de los procesos de ozonización, coagulación, floculación, filtración, producción de hipoclorito de sodio, cloración de bombas de alimentación y procesos de gestión de residuos. Además, los autores realizaron un estudio de modelado con el fin de regular el consumo energético de la planta. En [18] evaluaron el impacto del mecanismo de desarrollo limpio (MDL) propuesto por el protocolo de Kioto en la optimización del nexo de energía-agua-carbono en Hebei, China, proponiendo un modelo de programación entera mixta jerárquica de dos niveles. El modelo propuesto por los autores se ha centrado en el agua en la industria energética, especialmente en las tecnologías convencionales de generación con combustibles fósiles. En [19], propusieron un modelo de optimización estocástico que permitiera evaluar y optimizar la operación del nexo energía-agua-carbono en la provincia de Shanxi, una de las principales bases de energía térmica de China. El modelo permite evaluar el potencial de expansión de la capacidad del sistema eléctrico regional considerando el nexo energía-agua-carbono. En [11], los autores propusieron un modelo lineal entero mixto para la planificación óptima de un sistema de nexo energía-agua-carbono para el desarrollo sostenible de una comunidad. Este modelo considera energías renovables y diésel y la desalinización del agua del mar para producir agua potable. La solución del

modelo determina el tamaño óptimo de los componentes del nexo considerando la demanda de la comunidad con el mínimo costo del sistema y manteniendo las emisiones de gases invernadero en valores permitidos. Sin embargo, este modelo no considera el planeamiento de la red eléctrica de la comunidad ni la incertidumbre de las fuentes de energía renovables.

2.2.2.2. Comentarios finales

Después de realizar la búsqueda del estado del arte se puede observar que no existen referentes nacionales en esta temática y que la gran mayoría de trabajos son relacionados a casos de estudio de países de medio oriente o China. También, se pudo observar que la gran mayoría de trabajos se centran en la operación óptima del nexo energía-agua-carbono y que solo algunos trabajos se centran en el planeamiento óptimo del nexo; además de esto, los artículos relacionados con el planeamiento solo lo hacen desde un enfoque energético (es decir, solo encuentran la capacidad óptima de los elementos del nexo) y ninguno considera la red eléctrica dentro del problema de la energía. Solo en [11] se considera el nexo energía-agua-carbono en comunidades con problemas de acceso a energía y agua, ya que la gran mayoría de trabajos están enfocados en ciudades desarrolladas o entre diferentes regiones de China. Sin embargo, [11] no considera la incertidumbre de las fuentes de energía renovables y el planeamiento de la red eléctrica de la comunidad.

A diferencia de los trabajos anteriores, la metodología propuesta en esta investigación considera dentro del problema de planeamiento óptimo del nexo energía-agua-carbono, el planeamiento de la red eléctrica de la comunidad y la incertidumbre de las fuentes de energía renovables, lo cual muestra que la propuesta es pertinente ya que puede llenar algunos vacíos existentes en la literatura alrededor de esta temática.

2.3 Objetivos

2.3.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo matemático que permita evaluar y obtener el plan de expansión óptimo integrado de un sistema de Energía-Agua-Carbono para una comunidad, que considere la incertidumbre de las fuentes de energía renovables y el diseño de la red eléctrica.

2.3.2. Objetivos específicos

- i.* Proponer un modelo matemático que permita evaluar y obtener la capacidad y operación óptima de los elementos del sistema de nexo energía-agua-carbono para una comunidad.
- ii.* Modificar el modelo matemático del objetivo específico *i* para que permita evaluar y obtener la capacidad, ubicación y operación óptima de los elementos del sistema de nexo

energía-agua-carbono para una comunidad considerando también el diseño de la red eléctrica.

- iii.* Desarrollar un modelo matemático estocástico para integrar la incertidumbre de las fuentes de energía renovables en el modelo matemático del objetivo específico *ii*.

2.4 Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos anteriormente se propone el siguiente conjunto de actividades:

Para dar cumplimiento al objetivo *i*, se proponen las siguientes actividades:

- **Actividad 1:** realizar una revisión del estado del arte sobre el modelamiento de plantas de desalinización de agua de mar.
- **Actividad 2:** plantear un modelo matemático general que describa el problema de dimensionamiento y operación óptima de los elementos del sistema de nexo energía-agua-carbono para una comunidad.
- **Actividad 3:** implementar y solucionar el modelo matemático descrito en la Actividad 2 con un software especializado como Matlab, GAMS o AMPL.
- **Actividad 4:** validar los resultados obtenidos con un sistema de prueba de la literatura especializada.

Para dar cumplimiento al objetivo *ii*, se proponen las siguientes actividades:

- **Actividad 5:** plantear un modelo matemático general que describa el problema de dimensionamiento, localización y operación óptima de los elementos de la red eléctrica de la comunidad considerando la generación solar, eólica, diésel y los sistemas de baterías.
- **Actividad 6:** implementar y solucionar el modelo matemático descrito en la Actividad 5 con un software especializado como Matlab, GAMS o AMPL.
- **Actividad 7:** validar los resultados obtenidos con un sistema de prueba de la literatura especializada.
- **Actividad 8:** plantear un modelo matemático general que unifique los modelos matemáticos descritos en las actividades 2 y 5.
- **Actividad 9:** implementar y solucionar el modelo matemático descrito en la Actividad 7 con un software especializado como Matlab, GAMS o AMPL.
- **Actividad 10:** analizar los resultados obtenidos.

Para dar cumplimiento al objetivo *iii*, se proponen las siguientes actividades:

- **Actividad 11:** realizar una revisión del estado del arte sobre el modelamiento de la incertidumbre de las fuentes de energía renovables.
- **Actividad 12:** plantear la versión estocástica del modelo descrito en la actividad 8 para incluir la incertidumbre de la generación solar y eólica.
- **Actividad 13:** implementar y solucionar el modelo matemático descrito en la Actividad 12 con un software especializado como Matlab, GAMS o AMPL.

- **Actividad 14:** validar y analizar los resultados del modelo descrito en la actividad 12 con un sistema de la vida real.
- **Actividad 15:** desarrollar los documentos finales y difundir los resultados obtenidos en los diferentes medios de divulgación científica (Publicación en revistas indexadas y en eventos científicos).

Nota:

1. Para la ejecución de las actividades relacionadas con la revisión del estado del arte, la UTP cuenta con afiliación a bases de datos de *Science Direct* e *IEEE Xplore*, así como el acceso a bibliotecas de diferentes universidades a nivel mundial.
2. Para la ejecución de los objetivos relacionados con la solución de los modelos matemáticos, la UTP cuenta con licencias de software especializado como Matlab, GAMS y AMPL.

2.5 Cronograma de Actividades

Las actividades presentadas en la Tabla 1 están asociadas a cada frente de trabajo descrito en el numeral anterior.

Tabla 1. Cronograma de trabajo

| O E | A | Mes | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| i | 1 | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ii | 5 | | | | | | | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 6 | | | | | | | | | X | X | | | | | | | | | | | | | | |
| | 7 | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | |
| | 8 | | | | | | | | | | | X | X | X | | | | | | | | | | | |
| | 9 | | | | | | | | | | | | | X | X | | | | | | | | | | |
| | 10 | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | |
| iii | 11 | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | |
| | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | | | | | | | |
| | 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | | | | | | |
| | 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | |
| | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | X | X | X | |

OE: Objetivo Específico

A: Actividad

2.6 Productos esperados

Con el desarrollo de este proyecto se proponen cinco (5) productos esperados, como se ilustra en la Tabla 2

Tabla 2. Tipos de productos esperados

| Productos de Generación de Nuevo Conocimiento | Cantidad |
|--|--|
| Artículo de investigación publicado en revista ubicada en cuartiles Q1, Q2, Q3 (índice de impacto) | ● Un (1) artículo en revista indexada. |
| Libros resultados de investigación | |
| Capítulos en libro resultado de investigación | |
| Productos tecnológicos patentados o en proceso de concesión de la patente. | |
| Variedad vegetal y variedad animal | |
| Obras o productos de investigación creación en Artes, Arquitectura y Diseño. | |
| Productos de Formación de Recursos Humanos | Cantidad |
| Trabajo de grado de Pregrado | ● Dos (2) trabajos de grado de pregrado. ● Un (1) trabajo de grado de maestría. |
| Trabajo de grado de Maestría | |
| Tesis de doctorado | |
| Productos resultados de actividades de investigación, desarrollo e innovación | Cantidad |
| Productos tecnológicos certificados o validados | |
| Productos empresariales | |
| Regulaciones, normas, reglamentos o legislaciones | |
| Consultorías científico – tecnológicas e informes técnicos finales | |
| Productos de Apropiación Social del Conocimiento | Cantidad |
| Participación ciudadana en CTI | Un (1) artículo en congreso nacional y/o internacional. |
| Estrategias pedagógicas para el fomento de CTI | |
| Comunicación social del conocimiento | |
| Circulación del conocimiento especializado | |
| Reconocimientos | |

2.7 Objetivos de desarrollo sostenible

Objetivo 1: Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo

Objetivo 2: Poner fin al hambre

Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades

Objetivo 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos

Objetivo 5: Lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y las niñas

X Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos

X Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna

Objetivo 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos

Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación

Objetivo 10: Reducir la desigualdad en y entre los países

Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles

Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles

X Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos

Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos

Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad

Objetivo 16: Promover sociedades justas, pacíficas e inclusivas

Objetivo 17: Revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible

2.8 Declaración de bioética

Si: _____

No: **X**

2.9 Bibliografía

- [1] Organización de Naciones Unidas (ONU), “Objetivos de Desarrollo Sostenible.” <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (accessed Jul. 10, 2022).
- [2] J. I. Silva Ortega, E. Ojeda C, and J. E. Candelo, “Perspectivas de Comunidades Indígenas de La Guajira Frente al Desarrollo Sostenible y el Abastecimiento Energético,” *Espacios*, vol. 38, no. 11, 2017.
- [3] A. R. Daza-Daza, C. A. Serna-Mendoza, and A. Carabalí-Angola, “El Recurso Agua en las Comunidades Indígenas Wayuu de La Guajira Colombiana. Parte 2: Estudio Cualitativo de las Condiciones de Higiene, Aseo y Disponibilidad de Agua,” *Información tecnológica*, vol. 29, no. 6, pp. 25–32, Dec. 2018, doi: 10.4067/S0718-07642018000600025.
- [4] G. Carvajal-Romo, M. Valderrama-Mendoza, D. Rodríguez-Urrego, and L. Rodríguez-Urrego, “Assessment of solar and wind energy potential in La Guajira, Colombia: Current status, and future prospects,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 36, p. 100531, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.seta.2019.100531.
- [5] L. M. González R and C. A. Castillo V, “What technologies are being applied in La Guajira (Colombia) for the collection and distribution of water?,” *Tekhnê*, vol. 15, no. 1, Jul. 2018.
- [6] A. Haghighat Mamaghani, S. A. Avella Escandon, B. Najafi, A. Shirazi, and F. Rinaldi, “Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia,” *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 293–305, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.05.086.

- [7] A. Vides-Prado *et al.*, “Techno-economic feasibility analysis of photovoltaic systems in remote areas for indigenous communities in the Colombian Guajira,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 4245–4255, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.101.
- [8] Y. Yang, S. Bremner, C. Menictas, and M. Kay, “Modelling and optimal energy management for battery energy storage systems in renewable energy systems: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, p. 112671, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112671.
- [9] Z. Yang *et al.*, “Robust multi-objective optimal design of islanded hybrid system with renewable and diesel sources/stationary and mobile energy storage systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 148, p. 111295, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111295.
- [10] A. Subramani and J. G. Jacangelo, “Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review,” *Water Research*, vol. 75, pp. 164–187, May 2015, doi: 10.1016/j.watres.2015.02.032.
- [11] H. Mehrjerdi and A. A. M. Aljabery, “Modeling and Optimal Planning of an Energy–Water–Carbon Nexus System for Sustainable Development of Local Communities,” *Advanced Sustainable Systems*, vol. 5, no. 7, p. 2100024, Jul. 2021, doi: 10.1002/adsu.202100024.
- [12] V. Vahidinasab *et al.*, “Overview of Electric Energy Distribution Networks Expansion Planning,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 34750–34769, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2973455.
- [13] X. Yang, Y. Wang, M. Sun, R. Wang, and P. Zheng, “Exploring the environmental pressures in urban sectors: An energy-water-carbon nexus perspective,” *Applied Energy*, vol. 228, pp. 2298–2307, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.090.
- [14] S. Chen, Y. Tan, and Z. Liu, “Direct and embodied energy-water-carbon nexus at an inter-regional scale,” *Applied Energy*, vol. 251, p. 113401, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113401.
- [15] F. Meng, G. Liu, S. Liang, M. Su, and Z. Yang, “Critical review of the energy-water-carbon nexus in cities,” *Energy*, vol. 171, pp. 1017–1032, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.01.048.
- [16] X.-C. Wang *et al.*, “Water-Energy-Carbon Emissions nexus analysis of China: An environmental input-output model-based approach,” *Applied Energy*, vol. 261, p. 114431, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114431.
- [17] S. Bukhary, J. Batista, and S. Ahmad, “Water -energy -carbon nexus approach for sustainable large-scale drinking water treatment operation,” *Journal of Hydrology*, vol. 587, p. 124953, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124953.
- [18] Q. Tan, Y. Liu, and Q. Ye, “The impact of clean development mechanism on energy-water-carbon nexus optimization in Hebei, China: A hierarchical model based discussion,” *Journal of Environmental Management*, vol. 264, p. 110441, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110441.
- [19] Q. Tan, Y. Liu, and X. Zhang, “Stochastic optimization framework of the energy-water-emissions nexus for regional power system planning considering multiple uncertainty,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 281, p. 124470, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124470.

3 Presupuesto

Ver el archivo “4. Presupuesto”.