



Flujo de potencia óptimo en sistemas de distribución AC/DC bajo un enfoque de nexo energía-agua-carbono para el desarrollo sostenible de comunidades aisladas*

Alejandro Valencia Díaz^a ■ Ramón Alfonso Gallego Rendón^b ■
Eliana Mirledy Toro Ocampo^c

Resumen: En esta investigación se propone un modelo matemático que permite obtener la operación óptima de una red eléctrica híbrida AC/DC y el sistema de agua en comunidades aisladas, mientras se gestionan las emisiones de dióxido de carbono. De esta manera, la operación óptima de este nexo energía-agua-carbono permite contribuir al desarrollo sostenible de las comunidades aisladas. En el problema se considera la operación óptima de los elementos de la red AC/DC (voltajes, corrientes, el índice de modulación de los convertidores y el estado de operación del convertidor, es decir, si debe trabajar como inversor o rectificador), la operación óptima del generador diésel para disminuir las emisiones de dióxido de carbono, la operación óptima de los sistemas de baterías para aprovechar al máximo las fuentes renovables y así reducir las emisiones de dióxido de carbono y la operación óptima de la planta desalinizadora de agua de mar y el tanque de agua (operación óptima de las bombas de vaciado y llenado del tanque). En este trabajo se plantea un nuevo modelo no lineal entero mixto, que permite representar el problema propuesto. Este modelo considera la eficiencia de los convertidores y los sistemas de baterías. Es implementado en GAMS y resuelto con el solucionador de optimización comercial BONMIN. Los resultados obtenidos muestran que los recursos energéticos

* Artículo de investigación.

- a Magíster en Ingeniería eléctrica, ingeniero electricista, de la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
Correo electrónico: alejovd4512@utp.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-6746>
- b Doctor en Ingeniería Eléctrica, magíster en Sistemas Eléctricos de Potencia, especialista en Gestión de Sistema Energéticos, ingeniero electricista, de la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
Correo electrónico: ragr@utp.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0160-8929>
- c Doctor en Ingeniería, magíster en Investigación de Operaciones y Estadística, magíster en Ingeniería Eléctrica, ingeniera industrial, de la Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
Correo electrónico: elianam@utp.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6333-0977>

distribuidos permiten disminuir las emisiones de dióxido de carbono y los costos operativos del nexo energía-agua-carbono de la comunidad aislada, en aproximadamente un 36 %.

Palabras clave: flujo de potencia óptimo; red híbrida AC/DC; nexo energía-agua-carbono; objetivos de desarrollo sostenible; recursos energéticos distribuidos; planta desalinizadora de agua de mar

Recibido: 31/03/2024 **Aceptado:** 17/07/2024 **Disponible en línea:** 29/10/2024

Cómo citar: Valencia Díaz, A., Gallego Rendón, R. A., & Toro Ocampo, E. M. (2024). Flujo de potencia óptimo en sistemas de distribución ac/dc bajo un enfoque de nexo energía-aguacarbono para el desarrollo sostenible de comunidades aisladas. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 34(2), 43–61. <https://doi.org/10.18359/rcin.7272>

Optimal Power Flow in AC/DC Distribution Systems Under an Energy-Water-Carbon Nexus Approach for the Sustainable Development of Isolated Communities

Abstract: This research proposes a mathematical model aimed at achieving optimal operation of a hybrid AC/DC electrical network and water system in isolated communities, while managing carbon dioxide emissions. The optimal operation of this energy-water-carbon nexus contributes to the sustainable development of these communities. The optimization problem encompasses various aspects, including the efficient operation of network components such as voltages, currents, and converter modulation indices, along with the operational state of converters (i.e., whether they should function as inverters or rectifiers). Additionally, the model considers the optimal operation of diesel generators to minimize carbon dioxide emissions, while battery systems are optimized to maximize renewable energy utilization and, consequently, reduce carbon dioxide emissions. Moreover, the optimal operation of a seawater desalination plant and a water tank, including the effective management of pumps for tank filling and emptying, is also addressed. In this work, a new mixed integer nonlinear model is proposed to represent the problem. This model allows the efficiency of converters and battery systems to be considered. The model is implemented in GAMS and solved with the commercial optimization solver BONMIN. The results obtained show that distributed energy resources can reduce carbon dioxide emissions and operating costs of the energy-water-carbon nexus of the isolated community by approximately 36%.

Keywords: Optimal Power Flow; AC/DC Hybrid Network; Energy-water-carbon Nexus; Sustainable Development Goals; Distributed Energy Resources; Seawater Desalination Plant

Fluxo de potência ideal em sistemas de distribuição AC/DC sob uma abordagem de nexo energia-água-carbono para o desenvolvimento sustentável de comunidades isoladas

Resumo: Nesta pesquisa, propõe-se um modelo matemático que permite obter a operação ideal de uma rede elétrica híbrida AC/DC e do sistema de água em comunidades isoladas, enquanto se gerenciam as emissões de dióxido de carbono. Dessa forma, a operação ideal desse nexo energia-água-carbono contribui para o desenvolvimento sustentável das comunidades isoladas. No problema, considera-se a operação ideal dos elementos da rede AC/DC (tensões, correntes, o índice de modulação dos conversores e o estado de operação do conversor, ou seja, se deve funcionar como inversor ou retificador), a operação ideal do gerador a diesel para reduzir as emissões de dióxido de carbono, a operação ideal dos sistemas de baterias para aproveitar ao máximo as fontes renováveis e, assim,

reduzir as emissões de dióxido de carbono, e a operação ideal da planta dessalinizadora de água do mar e do tanque de água (operação ideal das bombas de esvaziamento e enchimento do tanque). Neste trabalho, propõe-se um novo modelo não linear inteiro misto, que permite representar o problema proposto. Esse modelo considera a eficiência dos conversores e dos sistemas de baterias. É implementado no GAMS e resolvido com o solucionador de otimização comercial BONMIN. Os resultados obtidos mostram que os recursos energéticos distribuídos permitem reduzir as emissões de dióxido de carbono e os custos operacionais do nexo energia-água-carbono da comunidade isolada em aproximadamente 36%.

Palavras-chave: fluxo de potência ideal; rede híbrida AC/DC; nexo energia-água-carbono; objetivos de desenvolvimento sustentável; recursos energéticos distribuídos; planta dessalinizadora de água do mar

Introducción

En la actualidad, se ha observado un crecimiento significativo en la demanda de energía a nivel global, impulsado por el avance industrial y el crecimiento demográfico. Sin embargo, este crecimiento ha estado acompañado de preocupaciones ambientales, particularmente en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, Colombia ha buscado impulsar, incentivar y normalizar el uso de fuentes renovables de energía, con el fin de avanzar hacia una transición energética que fomente la neutralidad de carbono [1], [2].

De esta forma, los sistemas de distribución de energía han adquirido una importancia crucial, ya que representan una oportunidad para integrar fuentes de energía renovable y reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO_2). En Colombia, en regiones remotas y aisladas, el suministro de energía confiable y sostenible es un desafío constante. Estas zonas no interconectadas (ZNI) suelen depender de generadores diésel para satisfacer sus necesidades energéticas, lo que no solo resulta costoso, sino que también contribuye significativamente a las emisiones de CO_2 y al calentamiento global [3]. Sin embargo, en la península de La Guajira hay un gran potencial para la generación solar y eólica, lo cual puede permitir reducir las emisiones de CO_2 y diversificar la matriz energética de las ZNI [4]. Además, es fundamental destacar que, para lograr una integración efectiva de las fuentes de energía renovable, se requiere contar con sistemas de almacenamiento de energía que mejoren la gestión de la energía en las ZNI [4], [5].

Es crucial tener en cuenta que, aunque las fuentes de energía renovable, junto con los sistemas de almacenamiento de energía (recursos energéticos distribuidos), pueden contribuir a la reducción de las emisiones de CO_2 , no pueden reemplazar por completo a los generadores diésel. Estos últimos seguirán siendo necesarios para cubrir la demanda eléctrica que no pueda ser suplida por las fuentes renovables o durante mantenimientos programados en los recursos energéticos distribuidos en las ZNI [4], [6]. Por lo tanto, es crucial operar los sistemas de baterías de manera óptima para aprovechar

al máximo las fuentes renovables y así reducir las emisiones de CO_2 .

Tradicionalmente, estos recursos energéticos distribuidos se han integrado en sistemas de distribución de corriente alterna (AC, por sus siglas en inglés) que cuentan con fuentes de generación diésel. Sin embargo, esto puede ocasionar costos y pérdidas adicionales, producto de los convertidores utilizados para integrar los paneles solares y los sistemas de batería que normalmente operan en corriente directa (DC, por sus siglas en inglés) [7], [8], [9]. En este contexto, los sistemas de distribución híbridos AC/DC han cobrado relevancia en microrredes aisladas, gracias a la integración fácil y flexible de las fuentes diésel y los recursos energéticos distribuidos [10], [11], [12], [13]. Es importante destacar que hoy en día ya existen diversos elementos que operan en DC, como refrigeradores, equipos electrónicos e iluminación LED, por lo que la operación en DC no presenta inconvenientes [14], [15].

Además de los desafíos relacionados con el suministro de energía confiable y sostenible, la península de La Guajira también tiene otros problemas relacionados con el acceso al agua potable y la seguridad alimentaria [16], [17]. Usualmente, en estas áreas el agua se obtiene de pozos que acceden a aguas subterráneas, pero el agotamiento de estos acuíferos se está convirtiendo en un problema cada vez mayor, debido a su explotación durante décadas [17]. Una solución potencial a este problema es la desalinización del agua de mar, lo cual no sería difícil de implementar en La Guajira por su proximidad al mar y por la abundancia de agua salada en el planeta [18], [19]. De esta forma, el acceso a agua potable no sería un problema, y tampoco a la comida, dado que esta nueva fuente de agua puede ser utilizada para irrigar cultivos y de esta forma mejorar la producción ganadera [17], [20], [21], [22], [23].

A pesar de los beneficios de la planta desalinizadora de agua de mar, existen algunas limitaciones en términos de costos y consumo de energía [23], [24], [25]. Sin embargo, estos problemas pueden ser mitigados con la integración de recursos energéticos distribuidos y un tanque de agua que

permita almacenar el agua generada por la planta desalinizadora; de esta manera, se puede tener un manejo eficiente de la planta [17], [26], [27], [28]. Finalmente, en las comunidades de la península de La Guajira se tiene una relación estrecha entre la energía, el agua potable y las emisiones de CO_2 , que se conoce como nexo energía-agua-carbono [29].

En este contexto, las comunidades de La Guajira se enfrentan al desafío de gestionar de manera óptima el nexo energía-agua-carbono, lo que implica la necesidad de una gestión eficiente de la energía, la reducción de las emisiones de CO_2 y el manejo efectivo de la planta desalinizadora. Además, se destaca la importancia de una operación óptima de la microrred híbrida AC/DC, lo que plantea un problema de flujo de potencia óptimo en sistemas de distribución AC/DC bajo un enfoque de nexo energía-agua-carbono.

En 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) estableció un conjunto de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) globales, con el propósito de eliminar la pobreza, proteger el medio ambiente y promover la prosperidad para todos. Entre estos objetivos, se incluyen la erradicación de la pobreza (ODS 1), el fin del hambre (ODS 2), el acceso a agua limpia y saneamiento (ODS 6), el acceso a energía no contaminante (ODS 7) y la acción contra el cambio climático (ODS 13) [30]. Es crucial destacar que la correcta gestión del vínculo entre energía, agua y carbono puede contribuir significativamente al logro de estos objetivos y al desarrollo sostenible de las comunidades aisladas de La Guajira.

A continuación, se muestra la revisión del estado del arte del problema. Primero, los trabajos que han trabajado el problema del flujo de potencia en redes de distribución híbridas AC/DC, y luego, los que consideran el problema del flujo de potencia bajo un enfoque de nexo energía-agua-carbono. En el caso del problema del flujo de potencia en redes de distribución híbridas AC/DC se encontraron los siguientes trabajos: en [31] se utiliza el *software* iHOGA para obtener la operación óptima de los elementos conectados a una microrred híbrida AC/DC. En este trabajo se considera una planta diésel, fuentes renovables y sistemas de baterías, sin embargo, no se contemplan los elementos de la red híbrida, tales como los convertidores ni la

topología de la red. En [32] se presenta un flujo de potencia óptimo bajo un enfoque monofásico para una microrred híbrida AC/DC aislada. El flujo de potencia se modela como un problema multiobjetivo no lineal en el que se busca minimizar costos.

En [33] se expone un flujo de potencia óptimo con un enrutador de potencia basado en un modelo de convertidor de fuente de voltaje (vsc, por sus siglas en inglés). En este trabajo se consideraron fuentes renovables y sistemas de baterías, sin embargo, no se garantiza el índice de modulación óptimo. En [34] se propone un modelo de programación cuadrática convexa con restricciones cuadráticas para resolver el problema del flujo de potencia óptimo en una microrred híbrida AC/DC. En este problema se aprecian fuentes renovables y un modelo para los convertidores, y se garantiza la operación independiente y aislada de cada red. En [35] se presenta un modelo de programación cónica de segundo orden para resolver el problema del flujo de potencia óptimo en un sistema de distribución híbrido AC/DC. En este trabajo se modela el vsc, sin embargo, el índice de modulación óptimo no es entregado directamente por el modelo de optimización. Además, solo se consideran fuentes renovables distribuidas.

En [36] se propuso un nuevo enfoque de gestión de energía en tiempo real para redes de distribución AC/DC, integrando técnicas de control de carga y reducción de tensión de conservación. El estudio desarrolló un algoritmo iterativo de programación lineal entera, mixta, para optimizar el funcionamiento de la red. El algoritmo simplificó el problema no convexo original mediante la utilización de técnicas de linealización, colas virtuales y funciones de Lyapunov. En este trabajo se consideraron paneles solares, sistemas de baterías, reguladores de tensión y bancos de capacitores. En [37] se expone un problema multiobjetivo basado en el método de Newton-Raphson para resolver el problema del flujo de potencia óptimo en una red híbrida AC/DC. Este problema multiobjetivo es tratado con algoritmo metaheurístico evolutivo basado en descomposición. En este trabajo no se consideran directamente los recursos energéticos distribuidos, pero sí como nodos controlados.

En el caso del problema del flujo de potencia bajo un enfoque de nexo energía-agua-carbono, se encontraron los siguientes trabajos: en [38] se propone un modelo de programación convexo entero-mixto para resolver el problema del flujo de potencia bajo un enfoque de nexo energía-agua en una ciudad. En este caso se modela el sistema de distribución AC junto con la red de agua de la ciudad, pero no se considera el efecto de las emisiones de CO_2 en el nexo. En [39] se plantea un modelo de programación cuadrático entero-mixto para resolver el problema del flujo de potencia bajo un enfoque de nexo energía-agua en una ciudad. En este caso se modela el sistema de distribución AC junto con la red de agua de la urbe, pero no se considera el efecto de las emisiones de CO_2 en el nexo.

En [40] se presenta un modelo robusto cónico de segundo orden entero-mixto para resolver el problema del flujo de potencia bajo un enfoque de nexo energía-agua en una ciudad. En este trabajo se modela el sistema de distribución AC junto con la red de agua y gas de la urbe, pero no se considera el efecto de las emisiones de CO_2 en el nexo. En [41] se expone un método de optimización distributiva robusta de dos etapas que resuelve el problema del flujo de potencia bajo un enfoque de nexo energía-agua en una ciudad, pero no se considera el efecto de las emisiones de CO_2 en el nexo. En este trabajo se modela el sistema de distribución AC junto con la red de gas y de agua de la urbe. En [42] se presenta un modelo de gestión óptimo en una microrred ubicada en La Guajira, bajo un enfoque de nexo energía-agua. En esta microrred se consideran paneles solares, turbinas eólicas y sistemas de baterías para la energía, y una planta desalinizadora para el agua. El problema es planteado como un modelo lineal que acepta la relación entre la energía y el agua, sin embargo, en este trabajo no se trata el problema del flujo de potencia óptimo de la microrred, es decir, no se piensa la topología de la red ni el modelamiento de los convertidores. Además, este trabajo no considera las emisiones de CO_2 dentro del nexo.

En [43] se plantea un modelo de planeamiento que utiliza una versión estocástica del modelo propuesto en [42]. En este problema se busca encontrar el dimensionamiento óptimo de los elementos

de una microrred de La Guajira, sin embargo, el problema del flujo de potencia óptimo de la microrred y el efecto de las emisiones de CO_2 sigue sin ser apreciado. En [44] se presenta un modelo no lineal que permite diseñar y operar de forma óptima un sistema de nexo de energía-agua-carbono para una ciudad, por lo tanto, no se consideran las plantas desalinizadoras. Además, en este trabajo no se atiende el problema del flujo de potencia óptimo de la red eléctrica ni tampoco el sistema de acueducto de la urbe.

En [45] se propone usar la optimización multiobjetivo para operar de forma óptima un sistema de nexo de energía-agua-carbono para una ciudad, por lo tanto, no se consideran las plantas desalinizadoras. Además, este trabajo no trata el problema del flujo de potencia óptimo de la red eléctrica ni tampoco el sistema de acueducto de la población. En [46] se expone un método de optimización distributiva robusta de dos etapas que resuelve el problema del flujo de potencia bajo un enfoque de nexo energía-agua-carbono en una ciudad. En este caso se modela el sistema de distribución AC junto con las redes de gas y de agua de la urbe.

De la revisión del estado del arte se puede anotar que existen varios vacíos en la literatura. Primero, que el problema del flujo de potencia bajo un enfoque de nexo energía-agua-carbono ha sido aplicado a ciudades, pero no se ha tenido muy presente en comunidades aisladas. Además, solo uno de los trabajos considera el nexo energía-agua-carbono, y en general enfoca el problema en el nexo energía-agua. El segundo vacío está relacionado con que solo se consideran redes AC en el nexo, y que los trabajos que resuelven el problema del flujo de potencia óptimo de redes híbridas AC/DC no consideran ningún enfoque de nexo, ni el de energía-agua ni el de energía-agua-carbono. Además, varios de estos trabajos no obtienen el índice de modulación óptimo de los convertidores. Finalmente, se pudo notar que los trabajos que consideraron el manejo óptimo del nexo energía-agua en comunidades aisladas, precisamente en La Guajira, no contemplan el problema del flujo de potencia óptimo de la red híbrida AC/DC ni el efecto de las emisiones de CO_2 .

Mientras que en este trabajo se proponen los siguientes aportes:

Aporte metodológico: se formula un enfoque de nexo energía-agua-carbono para abordar el problema del flujo de potencia óptimo en sistemas de distribución AC/DC. Este enfoque implica considerar la operación óptima de la red eléctrica, así como varios elementos, entre los cuales destacan los generadores diésel, los sistemas de baterías (carga y descarga), los convertidores de potencia (índice de modulación óptimo y operación como rectificador o inversor) y del sector agua (operación óptima de la planta desalinizadora de agua de mar y de las bombas de carga y descarga del tanque). Para representar este problema se plantea un nuevo modelo matemático no lineal, entero, mixto, el cual contempla la eficiencia de los convertidores y los sistemas de baterías. Este modelo es implementado en GAMS y resuelto con el solucionador de optimización comercial BONMIN.

Aporte de los resultados: se presenta una herramienta operativa basada en el modelo matemático planteado, que permite obtener la operación óptima de los diversos componentes mencionados anteriormente. Los resultados obtenidos demuestran una disminución significativa en los costos

de operación del nexo energía-agua-carbono y de las emisiones de CO₂ de la comunidad aislada, validando así la importancia de la herramienta propuesta para las comunidades.

Aporte teórico: si bien el trabajo no presenta explícitamente un nuevo marco teórico, el enfoque de nexo energía-agua-carbono y el desarrollo de un nuevo modelo matemático para abordar el problema del flujo de potencia óptimo en sistemas de distribución AC/DC representan contribuciones teóricas al campo de estudio. Estos aportes ofrecen una herramienta matemática que permite abordar problemas operativos relacionados con el desarrollo sostenible en comunidades aisladas.

Este documento está organizado de la siguiente manera: a continuación, se muestra la nomenclatura de los modelos propuestos. En la sección uno se detalla el problema formulado y se presenta el modelo matemático que describe el problema. En la sección dos se trata el sistema de prueba, los casos de estudio analizados y los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección tres se exponen las conclusiones y los trabajos futuros.

Nomenclatura

Conjuntos

- Ω_N : conjunto que contiene todos los nodos AC y DC del sistema.
- Ω_{NAC} : conjunto que contiene todos los nodos AC del sistema.
- Ω_{NDC} : conjunto que contiene todos los nodos DC del sistema.
- Ω_{NPV} : conjunto que contiene todos los nodos con paneles solares.
- Ω_{NWT} : conjunto que contiene todos los nodos con turbinas eólicas.
- Ω_{NB} : conjunto que contiene todos los nodos con sistemas de baterías.
- Ω_L : conjunto que contiene todos los tramos AC y DC del sistema.
- Ω_{VSC} : conjunto que contiene todos los convertidores vsc del sistema.
- Ω_T : conjunto que contiene los niveles de tiempo.

Parámetros

- S_{base} : potencia base del sistema en kVA.
- ΔT_t : duración de tiempo de cada nivel t en horas.

- CD:** costo del diésel en USD/L.
- FED:** factor que permite calcular los litros de diésel usados para producir la energía eléctrica en L / kWh.
- W_t^D : demanda total de agua de la comunidad para el tiempo t en m^3 .
- W_{max}^{WD} : capacidad máxima de generación de agua potable de la planta desalinizadora en m^3 .
- $W_{max}^{DP}, W_{max}^{CP}$: caudal máximo de la bomba de descarga y carga del tanque de agua en m^3 / h .
- W_{max}^{WS} : capacidad máxima del tanque de agua en m^3 .
- WS⁰, WS^F:** estado inicial y final del tanque de agua en m^3 .
- EWD:** consumo de potencia activa de la planta desalinizadora en kW / m^3 .
- EDP, EPC:** consumo de potencia activa de la bomba de descarga y carga del tanque de agua en kW / m^3 .
- R_{ij}, X_{ij} : resistencia y reactancia del tramo ij por unidad.
- $P_{i,t}^D, Q_{i,t}^D$: potencia activa y reactiva demandada en el nodo i para el tiempo t en por unidad.
- a_i^P, a_i^Z : coeficiente de potencia e impedancia constante del modelo ZIP de la carga conectada en el nodo i .
- Z_{ij} : impedancia del tramo ij por unidad.
- M_{minij} : índice de modulación mínimo del convertidor vsc en ij .
- M_{maxij} : índice de modulación máximo del convertidor vsc en ij .
- η_{ij}^{vsc} : eficiencia del convertidor vsc en ij .
- PF_{ij}^{vsc} : factor de potencia del convertidor vsc en ij .
- Q_{maxij}^{vsc} : potencia reactiva máxima del convertidor vsc en ij por unidad.
- S_{maxij}^{vsc} : potencia aparente máxima del convertidor vsc en ij por unidad.
- $G_{i,t}^{PV}$: generación del panel solar en el nodo i para el tiempo t por unidad.
- $G_{i,t}^{WT}$: generación de la turbina eólica en el nodo i para el tiempo t por unidad.
- E_t^B : capacidad de energía del sistema de baterías en el nodo i en kWh.
- T_i^{BC}, T_i^{BD} : tiempo de carga y descarga del sistema de baterías en el nodo i en h.
- η_i^{BC}, η_i^{BD} : eficiencia de carga y descarga del sistema de baterías en i .
- $SoC_{min_i}^B$: estado de carga mínimo del sistema de baterías en el nodo i en %.
- $SoC_{max_i}^B$: estado de carga máximo del sistema de baterías en el nodo i en %.
- SoC_i^0, SoC_i^F : estado de carga inicial y final del sistema de baterías en el nodo i en %.
- S_{maxij}^{DG} : potencia aparente máxima del generador diésel en i por unidad.
- I_{maxij} : corriente máxima del tramo ij por unidad.
- V_{min_i}, V_{max_i} : tensión mínima y máxima del nodo i por unidad.
- FDE:** factor que permite calcular las emisiones de CO_2 del generador diésel en kg / L.
- CO_{max}^2 : emisión de CO_2 máxima por día en kg.

Variables

- $P_{i,t}^{DG}, Q_{i,t}^{DG}$: potencia activa y reactiva entregada por el generador diésel en el nodo i para el tiempo t por unidad.
- WD_t : agua generada por la planta desalinizadora para el tiempo t en m^3 .

- DP_t, CP_t : caudal de la bomba de descarga y carga del tanque de agua para el tiempo t en m^3/h .
- WS_t : agua almacenada en el tanque para el tiempo t en m^3 .
- X_t^{WP} : variable binaria que indica si el tanque debe cargar o descargar agua para el tiempo t .
- PWD_t : potencia activa consumida por la planta desalinizadora para el tiempo t por unidad.
- PDP_t, PCP_t : potencia activa consumida por la bomba de descarga y carga del tanque de agua para el tiempo t por unidad.
- $P_{ij,t}, Q_{ij,t}$: potencia activa y reactiva que fluye por el tramo ij para el tiempo t por unidad.
- $V_{sqri,t}$: magnitud al cuadrado del voltaje en el nodo i para el tiempo t por unidad.
- $I_{sqrij,t}$: magnitud al cuadrado de la corriente en el tramo ij para el tiempo t por unidad.
- $P_{AC}^{vsc}{}_{ij,t}$: potencia activa que fluye por el lado AC del convertidor vsc en ij para el tiempo t por unidad.
- $Q_{AC}^{vsc}{}_{ij,t}$: potencia reactiva que fluye por el lado AC del convertidor vsc en ij para el tiempo t por unidad.
- $P_{DC}^{vsc}{}_{ij,t}$: potencia activa que fluye por el lado DC del convertidor vsc en ij para el tiempo t por unidad.
- $P_{DC}^{r,vsc}{}_{ij,t}$: potencia activa que fluye por el lado DC del convertidor vsc en ij operando como rectificador para el tiempo t por unidad.
- $P_{DC}^{i,vsc}{}_{ij,t}$: potencia activa que fluye por el lado DC del convertidor vsc en ij operando como inversor para el tiempo t por unidad.
- $X_{ij,t}^{vsc}$: variable binaria que indica el modo de operación (rectificador o inversor) del convertidor vsc en ij para el tiempo t .
- $P_{i,t}^{PV}$: potencia activa entregada por el panel solar en el nodo i para el tiempo t por unidad.
- $P_{i,t}^{WT}$: potencia activa entregada por la turbina eólica en el nodo i para el tiempo t por unidad.
- $P_{i,t,c}^B$: potencia activa entregada o consumida por el sistema de baterías en el nodo i para el tiempo t por unidad.
- $P_{i,t}^{BC}, P_{i,t}^{BC}$: potencia activa entregada y consumida por el sistema de baterías en el nodo i para el tiempo t por unidad.
- $X_{i,t}^B$: variable binaria que indica el estado de operación (carga o descarga) del sistema de baterías en el nodo i para el tiempo t .
- $SoC_{i,t,c}^B$: estado de carga del sistema de baterías en el nodo i para el tiempo t en %.

1. Descripción y formulación matemática del problema

En esta sección se detalla el problema propuesto y se muestra el modelo usado para resolver el problema de flujo de potencia óptimo en sistemas de distribución AC/DC bajo un enfoque de nexo energía-agua-carbono para el desarrollo sostenible de comunidades aisladas.

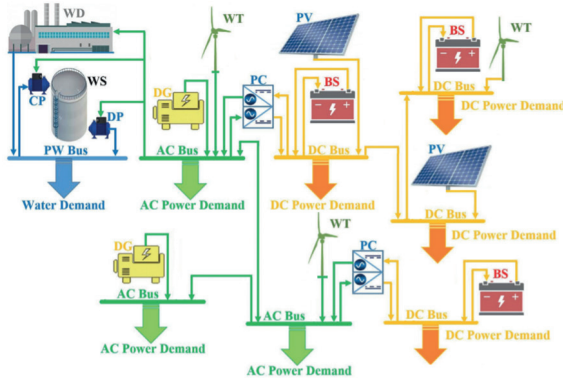
1.1 Descripción del problema

Como se explicó anteriormente, el consumo de agua está relacionado con la energía, porque la planta desalinizadora necesita energía eléctrica para funcionar y las emisiones de CO_2 están relacionadas con la energía eléctrica producida por los generadores

diésel. De esta forma, se puede decir que la producción de agua también estará relacionada con las emisiones de CO_2 . En la figura 1 se presenta el sistema eléctrico de una comunidad aislada operando bajo el enfoque de nexo energía-agua-carbono. Se puede observar que se tiene una red híbrida AC/DC en la que hay diversos recursos energéticos distribuidos, tales como turbinas de viento (WT, por sus siglas en inglés), paneles solares (PV, por sus siglas en inglés), generadores diésel (DG, por sus siglas en inglés) y sistemas de baterías (BS, por sus siglas en inglés). Además, esta red híbrida considera los convertidores de potencia (PC, por sus siglas en inglés), los tramos de red AC y DC que están representados como flechas entre los nodos eléctricos y las diferentes cargas en AC y en DC del sistema.

En la figura 1 se puede observar que el consumo de agua de la red híbrida AC/DC y de sus elementos energéticos es cero y que las emisiones de CO₂ solo están relacionadas con el generador diésel. El sector del agua comprende la planta desalinizadora (WD, por sus siglas en inglés), el depósito de almacenamiento de agua (ws, por sus siglas en inglés) y las bombas de agua de carga y descarga (CP y DP, por sus siglas en inglés, respectivamente). Como resultado, la energía demandada por el sector agua se consumirá en la planta desalinizadora y en las bombas de carga y descarga del tanque de agua. El objetivo final del nexo energía-agua-carbono es abastecer la demanda local de energía eléctrica (AD y DC) y de agua potable, que a su vez demanda energía eléctrica. Este objetivo debe alcanzarse a un costo asequible. Además, es necesario calcular y controlar la emisión total de carbono producida por todo el nexo.

Figura 1. Sistema de nexo energía-agua-carbono



Fuente: modificado de [29].

1.2 Modelo no lineal entero mixto

La función objetivo y las ecuaciones del problema descrito anteriormente que modelan el sector de agua potable, la red híbrida AC/DC y las emisiones de CO₂, así como la interrelación entre los sectores, se describen a continuación. Finalmente, el modelo no lineal entero mixto que representa el problema es planteado en (1)-(40).

1.3 Función objetivo

En la ecuación (1) se presenta la función objetivo, la cual minimiza los costos operativos de los generadores diésel.

$$\text{Min FO} = \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{i \in \Omega_{NDG}} P_{i,t}^{DG} S_{base} \Delta T_t \text{ FED CD} \quad (1)$$

1.4 Sector del agua

El sector del agua está conformado por la planta desalinizadora, el depósito de almacenamiento de agua, las bombas de agua de carga y descarga, y la demanda de agua potable. En la ecuación (2) se presenta el balance de agua del sistema: lo producido por la planta y lo descargado desde el tanque es igual a la demanda de agua local y a lo cargado por la bomba al tanque. En la ecuación (3) se limita la capacidad máxima de generación de la planta desalinizadora de agua de mar. En las ecuaciones (4) y (5) se limita el caudal máximo de las bombas de descarga y carga, respectivamente. En estas ecuaciones, la variable binaria $X_{i,t}^{WP}$ garantiza que el tanque no se cargue y descargue al mismo tiempo. En la ecuación (6) se calcula el agua almacenada por el tanque, dependiendo de lo descargado y cargado por las bombas. La ecuación (7) limita la capacidad del tanque de agua. Finalmente, las ecuaciones (8) y (9) garantizan el estado inicial y final del tanque de agua.

$$WD_t + DP_t \Delta T_t = CP_t \Delta T_t + WS_t^D \quad \forall t \in \Omega_T \quad (2)$$

$$0 \leq WD_t \leq W_{max}^{WD} \quad \forall t \in \Omega_T \quad (3)$$

$$0 \leq DP_t \leq W_{max}^{DP} X_{i,t}^{WP} \quad \forall t \in \Omega_T \quad (4)$$

$$0 \leq CP_t \leq W_{max}^{CP} (1 - X_{i,t}^{WP}) \quad \forall t \in \Omega_T \quad (5)$$

$$WS_t = WS_{t-1} - (DP_t - CP_t) \Delta T_t \quad \forall t \in \Omega_T \quad (6)$$

$$0 \leq WS_t \leq W_{max}^{WS} \quad \forall t \in \Omega_T \quad (7)$$

$$WS_t = WS^0 \quad t = 0 \quad (8)$$

$$WS_t = WS^F \quad t = T_{max} \quad (9)$$

1.5 Interconexión entre el sector del agua y de energía

Se debe recordar que la planta desalinizadora de agua de mar y las bombas de descarga y carga consumen energía eléctrica para su operación. Por lo tanto, las ecuaciones (10), (11) y (12) permiten calcular el consumo de potencia activa, dependiendo de la operación de la planta desalinizadora de agua, de las bombas de descarga y carga, respectivamente.

$$PWD_t = \frac{EWD WD_t}{S_{base}} \quad \forall t \in \Omega_T \quad (10)$$

$$PDP_t = \frac{EDP DP_t \Delta T_t}{S_{base}} \quad \forall t \in \Omega_T \quad (11)$$

$$PCP_t = \frac{EPC CP_t \Delta T_t}{S_{base}} \quad \forall t \in \Omega_T \quad (12)$$

1.6 Red híbrida AC/DC, considerando los convertidores y los recursos energéticos distribuidos

En las ecuaciones (13)-(39) se representa la operación de la red híbrida AC/DC, considerando la generación de las fuentes de energía renovable y la operación óptima de los generadores diésel, convertidores y sistemas de baterías. El modelo operativo de la red AC/DC está basado en el modelo DISTFLOW AC propuesto en [47]. El modelo de los sistemas de baterías utilizado puede ser consultado en [48]. El modelo de los convertidores vsc está basado en los modelos propuestos en [49], [50].

La ecuación (13) representa el balance de potencia activa en los nodos de AC del sistema. De esta manera, la ecuación (13) permite considerar los generadores diésel, los recursos energéticos distribuidos en AC, la demanda eléctrica de AC de la comunidad y el consumo eléctrico del sector del agua. La ecuación (14) representa el balance de potencia activa en los nodos DC del sistema. De esta manera, esta ecuación (14) permite considerar los recursos energéticos distribuidos en DC y la demanda eléctrica de DC de la comunidad. La ecuación (15) representa el balance de potencia reactiva en los nodos de AC del sistema. Se debe tener presente que las ecuaciones (13), (14) y (15) también consideran el modelo ZIP en las demandas eléctricas de la comunidad. La ecuación (16) permite calcular la caída de tensión

por los tramos de AC y DC del sistema. La ecuación (17) ayuda a determinar los voltajes del lado de AC y DC de los convertidores vsc, considerando los límites del índice de modulación.

La ecuación (18) deja calcular la potencia aparente que fluye por los tramos de AC y la potencia activa que fluye por los tramos de DC. La ecuación (19) calcula la potencia activa que fluye por los convertidores de vsc. Mientras que la ecuación (20) calcula la potencia activa que fluye por el lado de AC del convertidor, considerando su eficiencia y su modo de operación (rectificador o inversor). La ecuación (21) mide la potencia activa que fluye por el lado de DC del convertidor, dependiendo de su modo de operación. Las ecuaciones (22) y (23) ayudan a definir el modo de operación del convertidor vsc. En estas ecuaciones se utiliza la variable binaria $X_{ij,t}^{vsc}$ para definir el modo de operación del convertidor vsc, además, esta variable garantiza que el convertidor solo tenga un modo de operación en cada instante de tiempo. La ecuación (24) provee el cálculo del flujo de potencia reactiva en el lado de AC del convertidor vsc con el factor de potencia y la potencia activa del convertidor. Las ecuaciones (25) y (26) definen la potencia activa entregada por los paneles solares y las turbinas eólicas, respectivamente.

Las ecuaciones (27)-(33) representan la operación de los sistemas de baterías. La ecuación (27) define la potencia activa inyectada o consumida por el sistema de baterías. Las ecuaciones (28) y (29) limitan la potencia activa de carga y descarga del sistema de baterías, respectivamente. En estas ecuaciones se utiliza la variable binaria $X_{i,t}^B$ para definir el modo de operación de los sistemas de baterías, además, esta variable garantiza que los sistemas de baterías solo tengan un modo de operación en cada instante de tiempo. La ecuación (30) representa el estado de carga de los sistemas de baterías. La ecuación (31) limita el estado de carga de los sistemas de baterías. La ecuación (32) y (33) representa el estado inicial y final del estado de carga de los sistemas de baterías, respectivamente. Las ecuaciones (34) y (35) limitan la potencia reactiva y aparente del lado de AC de los convertidores vsc, respectivamente. La ecuación (36) limita la capacidad de potencia aparente generada por los generadores diésel. Las ecuaciones (37) y (38) representan los límites operativos de las

corrientes en los tramos y los voltajes del sistema híbrido AC/DC, respectivamente. La ecuación (39) garantiza que los generadores diésel solo pueden entregar y no consumir potencia activa ni reactiva.

$$\sum_{ki \in \Omega_L} P_{ki,t} - \sum_{ij \in \Omega_L} (P_{ij,t} + R_{ij} I_{sqr,ij,t}) - \sum_{iw \in \Omega_{VSC}} P_{AC, iw,t}^{VSC} + P_{i,t}^{DG} + P_{i,t}^{PV} + P_{i,t}^{WT} \quad (13)$$

$$+ P_{i,t}^B = P_{i,t}^D \left[a_i^P + a_i^Z V_{sqr,i,t} \right] + PWD_{i,t} + PDP_{i,t} + PCP_{i,t} \quad \forall i \in \Omega_{NAC}; \forall t \in \Omega_T$$

$$\sum_{ki \in \Omega_L} P_{ki,t} - \sum_{ij \in \Omega_L} (P_{ij,t} + R_{ij} I_{sqr,ij,t}) + \sum_{wi \in \Omega_{VSC}} P_{DC, wi,t}^{VSC} + P_{i,t}^{PV} + P_{i,t}^{WT} + P_{i,t}^B \quad (14)$$

$$= P_{i,t}^D \left[a_i^P + a_i^Z V_{sqr,i,t} \right] \quad \forall i \in \Omega_{NDC}; \forall t \in \Omega_T$$

$$\sum_{ki \in \Omega_L} Q_{ki,t} - \sum_{ij \in \Omega_L} (Q_{ij,t} + X_{ij} I_{sqr,ij,t}) - \sum_{iw \in \Omega_{VSC}} Q_{AC, iw,t}^{VSC} + Q_{i,t}^{DG} \quad (15)$$

$$= Q_{i,t}^D \left[a_i^P + a_i^Z V_{sqr,i,t} \right] \quad \forall i \in \Omega_N; \forall t \in \Omega_T$$

$$V_{sqr,i,t} - 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) - Z_{ij}^2 I_{sqr,ij,t} - V_{sqr,j,t} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_L; \forall t \in \Omega_T \quad (16)$$

$$M_{\min ij}^2 V_{sqr,j,t} \leq V_{sqr,i,t} \leq M_{\max ij}^2 V_{sqr,j,t} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_{VSC}; \forall t \in \Omega_T \quad (17)$$

$$V_{sqr,j,t} I_{sqr,ij,t} = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \quad \forall ij \in \Omega_L; \forall t \in \Omega_T \quad (18)$$

$$V_{sqr,j,t} I_{sqr,ij,t} = P_{DC, ij,t}^{VSC} \quad \forall ij \in \Omega_{VSC}; \forall t \in \Omega_T \quad (19)$$

$$P_{AC, ij,t}^{VSC} = \frac{P_{DC, ij,t}^{R,VSC}}{\eta_{ij}^{VSC}} - \eta_{ij}^{VSC} P_{DC, ij,t}^{L,VSC} \quad \forall ij \in \Omega_{VSC}; \forall t \in \Omega_T \quad (20)$$

$$P_{DC, ij,t}^{VSC} = P_{DC, ij,t}^{R,VSC} - P_{DC, ij,t}^{L,VSC} \quad \forall ij \in \Omega_{VSC}; \forall t \in \Omega_T \quad (21)$$

$$0 \leq P_{DC, ij,t}^{R,VSC} \leq S_{\max ij}^{VSC} X_{ij,t}^{VSC} \quad \forall ij \in \Omega_{VSC}; \forall t \in \Omega_T \quad (22)$$

$$0 \leq P_{DC, ij,t}^{L,VSC} \leq S_{\max ij}^{VSC} (1 - X_{ij,t}^{VSC}) \quad \forall ij \in \Omega_{VSC}; \forall t \in \Omega_T \quad (23)$$

$$Q_{AC, ij,t}^{VSC} = P_{AC, ij,t}^{VSC} \tan(\cos^{-1}(\text{PF}_{ij}^{VSC})) \quad \forall ij \in \Omega_{VSC}; \forall t \in \Omega_T \quad (24)$$

$$P_{i,t}^{PV} = G_{i,t}^{PV} \quad \forall i \in \Omega_{NPV}; \forall t \in \Omega_T \quad (25)$$

$$P_{i,t}^{WT} = G_{i,t}^{WT} \quad \forall i \in \Omega_{NWT}; \forall t \in \Omega_T \quad (26)$$

$$P_{i,t}^B = P_{i,t}^{BD} - P_{i,t}^{BC} \quad \forall i \in \Omega_{NB}; \forall t \in \Omega_T \quad (27)$$

$$0 \leq P_{i,t}^B \leq \left(\frac{E_i^B}{S_{\text{base}} T_i^{BC}} \right) X_{i,t}^B \quad \forall i \in \Omega_{NB}; \forall t \in \Omega_T \quad (28)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{BD} \leq \left(\frac{E_i^B}{S_{\text{base}} T_i^{BD}} \right) (1 - X_{i,t}^B) \quad \forall i \in \Omega_{NB}; \forall t \in \Omega_T \quad (29)$$

$$\text{SoC}_{i,t}^B = \text{SoC}_{i,t-1}^B - \left(\frac{1}{\eta_i^{BD}} P_{i,t}^{BD} - \eta_i^{BC} P_{i,t}^{BC} \right) S_{\text{base}} \Delta T_t \frac{100}{E_i^B} \quad \forall i \in \Omega_{NB}; \forall t \in \Omega_T \quad (30)$$

$$\text{SoC}_{\min i}^B \leq \text{SoC}_{i,t}^B \leq \text{SoC}_{\max i}^B \quad \forall i \in \Omega_{NB}; \forall t \in \Omega_T \quad (31)$$

$$\text{SoC}_{i,t}^B = \text{SoC}_i^0 \quad \forall i \in \Omega_{NB}; t = 0 \quad (32)$$

$$\text{SoC}_{i,t}^B = \text{SoC}_i^F \quad \forall i \in \Omega_{NB}; t = T_{\max} \quad (33)$$

$$-Q_{\max ij}^{VSC} \leq Q_{AC, ij,t}^{VSC} \leq Q_{\max ij}^{VSC} \quad \forall ij \in \Omega_{VSC}; \forall t \in \Omega_T \quad (34)$$

$$\left(P_{AC, ij,t}^{VSC} \right)^2 + \left(Q_{AC, ij,t}^{VSC} \right)^2 \leq \left(S_{\max ij}^{VSC} \right)^2 \quad \forall ij \in \Omega_{VSC}; \forall t \in \Omega_T \quad (35)$$

$$\left(P_{i,t}^{DG} \right)^2 + \left(Q_{i,t}^{DG} \right)^2 \leq \left(S_{\max i}^{DG} \right)^2 \quad \forall i \in \Omega_{VSC}; \forall t \in \Omega_T \quad (36)$$

$$0 \leq I_{sqr,ij,t} \leq I_{\max ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_L; \forall t \in \Omega_T \quad (37)$$

$$V_{\min i}^2 \leq V_{sqr,i,t} \leq V_{\max i}^2 \quad \forall i \in \Omega_N; \forall t \in \Omega_T \quad (38)$$

$$P_{i,t}^{DG} \geq 0; Q_{i,t}^{DG} \geq 0 \quad \forall i \in \Omega_{NDG}; \forall t \in \Omega_T \quad (39)$$

1.7 Interconexión entre el sector de energía y las emisiones de CO₂

Finalmente, la ecuación (40) representa el límite diario de emisiones de CO₂ de los generadores diésel.

$$\sum_{t \in \Omega_T} \sum_{i \in \Omega_{NDG}} P_{i,t}^{DG} S_{base} \Delta T_t FED FDE \leq CO2_{max} \quad (40)$$

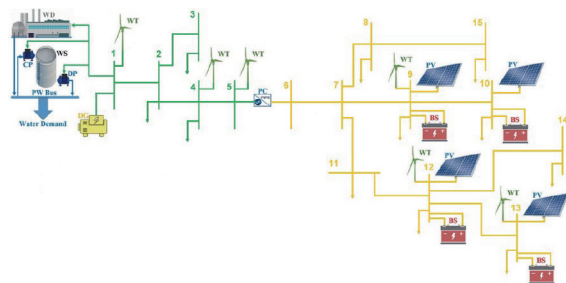
2. Resultados

En esta sección se presentan el sistema de prueba, los casos de estudio analizados y los resultados obtenidos.

2.1 Sistema de prueba

Para probar el modelo no lineal entero mixto presentado en las ecuaciones (1)-(40) se propone un sistema de prueba híbrido de AC/DC de 15 nodos que considera la demanda de agua de una comunidad. Esta red consta de cinco nodos en AC y de diez nodos en DC, con la integración de recursos energéticos distribuidos. La figura 2 muestra el sistema de prueba. En esta figura se puede observar que la red de AC está representada con el color verde y la red de DC con el color amarillo. Algunos de los datos relacionados con el sector de agua y carbono fueron obtenidos de [29], [51]. Los datos del sistema de prueba híbrido AC/DC de 15 nodos, considerando el nexo energía-agua-carbono, pueden ser consultados en [52].

Figura 2. Sistema de prueba híbrido AC/DC de 15 nodos, considerando el nexo energía-agua-carbono



Fuente: elaboración propia.

2.2 Casos de estudio

Los siguientes casos de estudio fueron analizados:

Caso 1: red híbrida AC/DC sin considerar paneles solares, turbinas eólicas ni sistemas de baterías. Solo se considera el generador diésel sin restricción de emisiones de CO₂.

Caso 2: red híbrida AC/DC, considerando paneles solares, turbinas eólicas, sistemas de baterías y el generador diésel con restricción de emisiones de CO₂ (CO₂^{max} es igual a 23 toneladas diarias).

Ambos casos consideran el sector agua y la relación entre los sectores del nexo energía-agua-carbono.

2.3 Resultados

El modelo propuesto fue implementado en el lenguaje de programación matemática GAMS (24.5.4), en un computador portátil con un procesador Intel® Core i5-7300HQ operando a 2.50 GHz con 8 GB RAM, en la versión de 64-bits, Windows 10 Home Single Language. El solucionador de optimización comercial BONMIN fue utilizado para resolver el problema no lineal entero mixto. Es importante destacar que las soluciones fueron forzadas a tener un gap relativo de optimalidad cero.

En la tabla 1 se puede observar una comparación entre los casos 1 y 2. Incluir fuentes de energía renovable y sistemas de baterías dentro de la red híbrida AC/DC de la comunidad aporta importantes beneficios económicos, ambientales y operativos. Se puede notar que el costo de operación de la planta diésel y las emisiones de CO₂ producidas por esta disminuyen en aproximadamente un 36 %. Se puede notar que el caso 1 no tiene restricción en las emisiones de CO₂, por lo tanto, si se forzara el cumplimiento de 23 ton al día de emisiones máximas, el problema no sería factible. Sin embargo, el caso 2 cumple el límite máximo de emisiones de CO₂ sin problema, gracias a los recursos energéticos distribuidos. También se puede notar que el costo de pérdidas de energía de la red disminuye en aproximadamente un 67 % y que el voltaje mínimo de todo el sistema en el día mejora en aproximadamente un 2,3 %. Finalmente, se puede notar que la solución del caso 2 fue obtenida en menor tiempo, lo cual indica que el sistema tiene mayor flexibilidad con los recursos energéticos distribuidos, a pesar de incrementar la complejidad matemática del problema.

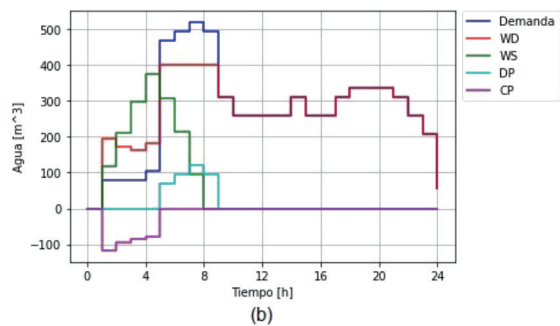
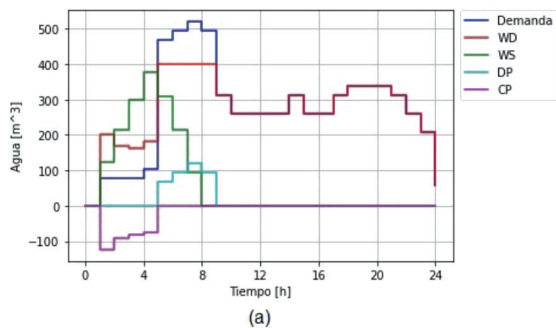
Tabla 1. Comparación de los resultados obtenidos entre los casos 1 y 2

Descripción	Caso 1	Caso 2	Reducción o mejoramiento [%]
Costo de compra de energía de la planta diésel en un día en USD	15 274,1408	9859,9420	35,4468
Costo de pérdidas de energía en el sistema en un día en USD	25,5674	8,5171	66,6877
Emisiones de CO ₂ en un día en TON	31,8211	20,5415	35,4469
Voltaje mínimo de todo el sistema en el día en pu	0,9724	0,9949	2,3139
Tiempo computacional en [s]	26,312	11,671	55,6438

Fuente: elaboración propia.

En la figura 3 se muestra el comportamiento en el tiempo de la demanda de agua, la producción de agua de la planta desalinizadora, el estado del tanque de agua y el agua entregada por las bombas de carga y descarga del tanque para los casos 1 y 2. En esta figura se puede notar que el comportamiento del sector agua en el tiempo es muy parecido entre ambos casos y solo se detectan cambios muy pequeños. Además, se puede notar que el tanque de agua y las bombas de carga y descarga son primordiales para abastecer la demanda de agua; gracias a estos elementos, los picos de demanda de agua pueden ser abastecidos sin necesidad de forzar la planta desalinizadora. Por lo tanto, estos elementos permiten ahorrar costos de operación de la planta, lo cual se traduce en una operación óptima de la planta de agua.

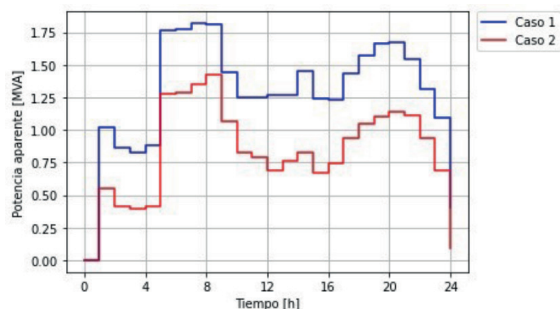
Figura 3. Comportamiento en el tiempo de la demanda de agua, la planta desalinizadora, el tanque de agua y las bombas de carga y descarga del tanque: a) caso 1, y b) caso 2



Fuente: elaboración propia.

En la figura 4 se muestra el comportamiento en el tiempo de la potencia aparente producida por el generador diésel del nodo 1 para los casos 1 y 2. En esta figura se puede notar que las fuentes renovables de energía y los sistemas de baterías contribuyen a disminuir la potencia de la planta diésel, lo cual se traduce en una reducción de los costos operativos. Además, se puede notar que el pico de potencia del caso 1 sucede en la hora siete con un valor de 1,8179 MVA, y que el pico de potencia del caso 2 sucede en la hora ocho con un valor de 1,4269 MVA. Por lo tanto, se puede notar que el pico de generación sufre un traslado en el tiempo y una reducción de aproximadamente el 22 %, gracias a la inclusión de fuentes renovables de energía y de sistemas de baterías en la red híbrida.

Figura 4. Comportamiento en el tiempo de la potencia aparente en MVA, producida por el generador diésel del nodo 1 para los casos 1 y 2

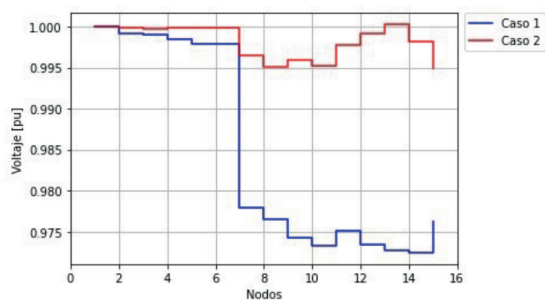


Fuente: elaboración propia.

Por un lado, en la figura 5 se puede observar el voltaje mínimo en todo el día para cada uno de los nodos del sistema de prueba híbrido AC/DC de 15 nodos de la figura 2. También, en esta figura se muestra que los recursos energéticos distribuidos permiten mejorar el voltaje mínimo de todos los nodos del sistema de la figura 2. Además, se presenta la importancia de modelar la red eléctrica en el problema de nexo energía-agua-carbono. Por lo tanto, se puede garantizar la operación óptima de la red eléctrica de la comunidad.

Por otro lado, se analizó el comportamiento del índice de modulación del convertidor vsc conectado entre los nodos 5 y 6, y se pudo observar que el valor óptimo para los dos casos fue de uno en todas las horas. Por lo tanto, no se amerita una gráfica que muestre el comportamiento de los índices de modulación del convertidor en los casos analizados.

Figura 5. Voltaje mínimo de los nodos del sistema de prueba híbrido AC/DC de 15 nodos en [pu] para los casos 1 y 2

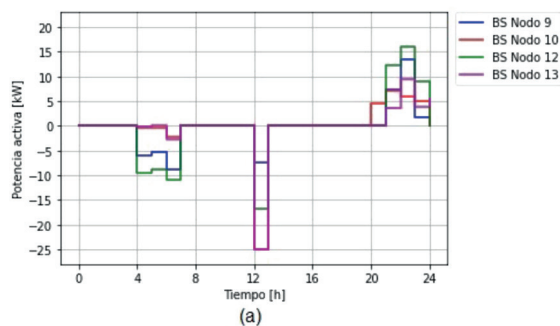


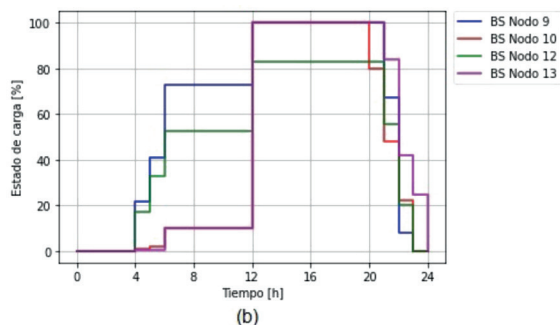
Fuente: elaboración propia.

En la figura 6 se puede observar el comportamiento en el tiempo de los sistemas de baterías conectados en los nodos 9, 10, 12 y 13 para el caso 2. Esta figura también muestra el comportamiento de la potencia activa en kW y del estado de carga en % de los sistemas de baterías del sistema de prueba híbrido AC/DC de 15 nodos de la figura 2. En esta figura se observa un comportamiento lógico entre el estado de carga y las potencias de carga y descarga de los sistemas de batería del sistema de prueba de la figura 2. Al comparar el comportamiento de los sistemas de baterías de la figura 6 con la potencia entregada por el generador diésel de la figura 4, se puede notar que las baterías se cargan en el intervalo de tiempo de la hora cuatro hasta la ocho, aproximadamente, sin embargo, el pico del caso 2 no se incrementa en comparación del caso 1, que en realidad es menor. La razón de este comportamiento es que se debe recordar que el sistema tiene fuentes de energía renovables.

Mientras que al comparar las figuras 4 y 6 se puede notar que las baterías aportan el pico en el intervalo de tiempo de la hora 20 a la 24. Finalmente, se puede decir que los sistemas de baterías permiten mejorar la gestión de la energía eléctrica de la comunidad.

Figura 6. Comportamiento en el tiempo de los sistemas de baterías conectados en los nodos 9, 10, 12 y 13 para el caso 2: a) potencia activa de los sistemas de baterías en kW, y b) estado de carga de los sistemas de baterías en %





Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

En este trabajo se propone un nuevo modelo no lineal entero mixto para resolver el problema de flujo de potencia óptimo en sistemas de distribución AC/DC bajo un enfoque de nexo energía-agua-carbono, para el desarrollo sostenible de comunidades aisladas. En el problema se considera la operación óptima de los elementos de la red AC/DC (voltajes, corrientes, índice de modulación de los convertidores y estado de operación del convertidor, es decir, si debe trabajar como inversor o rectificador), la operación óptima del generador diésel para disminuir las emisiones de CO_2 , de los sistemas de baterías para aprovechar al máximo las fuentes renovables y así reducir las emisiones de CO_2 , y de la planta desalinizadora de agua de mar y del tanque de agua (operación óptima de las bombas de vaciado y llenado del tanque). Además, este modelo permite considerar la eficiencia de los convertidores y de los sistemas de baterías.

Los resultados muestran el impacto de las fuentes renovables y de los sistemas de baterías en el sistema de prueba híbrido AC/DC, y el nexo energía-agua-carbono de la comunidad. Se puede notar que estos recursos energéticos distribuidos permiten reducir el costo de operación de la planta diésel y las emisiones de CO_2 producidas por esta en aproximadamente un 36 %. Además, se observa que estos recursos energéticos permiten cumplir el límite máximo diario de emisiones de CO_2 (23 TON). Finalmente, se debe tener presente que si se desea que el límite máximo sea igual a un valor

menor de 20 TON, se deben instalar más recursos energéticos para lograr este objetivo.

También se puede apreciar que los recursos energéticos distribuidos permiten mejorar las condiciones operativas de la red híbrida AC/DC de la comunidad. Se pudo advertir una reducción de aproximadamente el 67 % en el costo de pérdidas de energía de la red y una mejora de aproximadamente el 2,3 % en la tensión mínima de la red. Además, se pudo captar que el pico de generación sufre un traslado en el tiempo y una reducción de aproximadamente el 22 %. De esta manera, se puede concluir que la inclusión de fuentes de energía renovable, de sistemas de baterías dentro de la red híbrida AC/DC y del nexo energía-agua-carbono de la comunidad, aporta importantes beneficios económicos, ambientales y operativos.

Al final, este trabajo presenta una herramienta operativa que permite aportar al desarrollo sostenible de comunidades aisladas, como puede ser el caso de las comunidades de La Guajira, en Colombia, las cuales tienen un enorme potencial para las fuentes de energía renovable, gracias a su geografía. De esta manera, al garantizar una operación óptima y factible de la red híbrida AC/DC y el nexo energía-agua-carbono de la comunidad, se garantiza el acceso a energía no contaminante, a agua limpia y a saneamiento, y a la disminución de gases de efecto invernadero. Además, con el acceso al agua se garantiza una mejora en la agricultura y la producción ganadera de la comunidad, y con el acceso a la energía se promueve la educación y la erradicación de la pobreza, al brindar más oportunidades tecnológicas a la comunidad.

Como trabajos futuros se puede considerar los siguientes: 1) aplicar una relajación cónica o alguna técnica de linealización al modelo propuesto, para evaluar el rendimiento del modelo no lineal entero mixto; 2) considerar el modelo propuesto bajo un enfoque multiobjetivo, con el fin de considerar el impacto de las emisiones de CO_2 dentro de la función objetivo, y 3) modificar el modelo propuesto, con el fin de considerar la localización y dimensionamiento óptimo de los elementos del nexo energía-agua-carbono.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Facultad de Ciencias Empresariales, de la Universidad Tecnológica

de Pereira, Colombia, bajo el proyecto denominado “Planeamiento óptimo integrado de sistemas de energía-agua-carbono para el desarrollo sostenible de comunidades”, e identificado con el código 7-23-1.

Referencias

- [1] Congreso de la República de Colombia, “Ley 1715 de 2014”, Colombia, 2014. [En línea]. Disponible en http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf
- [2] Congreso de la República de Colombia, “Ley 2099 de 2021”, Colombia, 2021. [En línea]. Disponible en <https://min-transporte.gov.co/documentos/702/transporte-sostenible/?genPagDocs=1>
- [3] E. E. Gaona, C. L. Trujillo, and J. A. Guacaneme, “Rural microgrids and its potential application in Colombia”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 125-137, nov. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.176.
- [4] G. Carvajal-Romo *et al.*, “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, dic. 2019, doi: 10.1016/j.seta.2019.100531.
- [5] A. Haghghat Mamaghani *et al.*, “Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia”, *Renew Energy*, vol. 97, pp. 293-305, nov. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.05.086.
- [6] L. M. Hinestroza-Olascuaga, P. M. S. Carvalho, and C. M. S. Cardoso de Jesús, “Lowering risk intolerance to unlock private investments in renewable energy-based rural electrification”, *Energy for Sustainable Development*, vol. 74, pp. 258-268, jun. 2023, doi: 10.1016/j.esd.2023.02.011.
- [7] Z. Liu y M. Li, “Research on Energy Efficiency of DC Distribution System”, *AASRI Procedia*, vol. 7, pp. 68-74, 2014, doi: 10.1016/j.aasri.2014.05.031.
- [8] H. Lotfi, and A. Khodaei, “AC Versus DC Microgrid Planning”, *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 296-304, ene. 2017, doi: 10.1109/TSG.2015.2457910.
- [9] P. Rani, V. Parkash, and N. K. Sharma, “Technological aspects, utilization and impact on power system for distributed generation: A comprehensive survey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 192, p. 114257, mar. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114257.
- [10] H. Lotfi, and A. Khodaei, “Hybrid AC/DC microgrid planning”, *Energy*, vol. 118, pp. 37-46, ene. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.015.
- [11] O. Azeem *et al.*, “A Comprehensive Review on Integration Challenges, Optimization Techniques and Control Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid”, *Applied Sciences*, vol. 11, no. 14, p. 6242, jul. 2021, doi: 10.3390/app11146242.
- [12] S. Charadi *et al.*, “Efficiency and energy-loss analysis for hybrid AC/DC distribution systems and microgrids: A review”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, dic. 2021, doi: 10.1002/2050-7038.13203.
- [13] A. Bharatee, P. K. Ray, B. Subudhi, and A. Ghosh, “Power Management Strategies in a Hybrid Energy Storage System Integrated AC/DC Microgrid: A Review”, *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 19, p. 7176, sep. 2022, doi: 10.3390/en15197176.
- [14] D. L. Gerber, R. Liou, and R. Brown, “Energy-saving opportunities of direct-DC loads in buildings”, *Appl Energy*, vol. 248, pp. 274-287, ago. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.089.
- [15] M. Rodriguez, D. Arcos-Aviles, and F. Guinjoan, “Simple fuzzy logic-based energy management for power exchange in isolated multi-microgrid systems: A case study in a remote community in the Amazon region of Ecuador”, *Appl Energy*, vol. 357, p. 122522, mar. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122522.
- [16] W. Avilés, “The Wayúu tragedy: death, water and the imperatives of global capitalism”, *Third World Q*, vol. 40, no. 9, pp. 1750-1766, sep. 2019, doi: 10.1080/01436597.2019.1613638.

- [17] I. Granit, “Microgrids through the Energy-Water-Food Security Nexus in La Guajira, Colombia: Increasing water and food security or jeopardizing groundwater levels?”, *Energy Res Soc Sci*, vol. 93, p. 102814, nov. 2022, doi: 10.1016/j.erss.2022.102814.
- [18] L. M. González, and C. A. Castillo, “What technologies are being applied in La Guajira (Colombia) for the collection and distribution of water?”, *Tekhnê*, vol. 15, no. 1, pp. 39-44, 2018.
- [19] D. Serrano-Florez *et al.*, “Analysis and simulation of reverse osmosis equipment: Case of La Guajira, Colombia”, *Comput Chem Eng*, vol. 171, p. 108145, mar. 2023, doi: 10.1016/j.compchemeng.2023.108145.
- [20] R. Kumar *et al.*, “Desalination for agriculture: water quality and plant chemistry, technologies and challenges”, *Water Supply*, vol. 18, no. 5, pp. 1505-1517, oct. 2018, doi: 10.2166/ws.2017.229.
- [21] V. Martínez-Álvarez *et al.*, “Desalination of Seawater for Agricultural Irrigation”, *Water (Basel)*, vol. 12, no. 6, p. 1712, jun. 2020, doi: 10.3390/w12061712.
- [22] B. J. Hipólito-Valencia *et al.*, “Incorporating a seawater desalination scheme in the optimal water use in agricultural activities”, *Agric Water Manag*, vol. 244, p. 106552, feb. 2021, doi: 10.1016/j.agwat.2020.106552.
- [23] J. El Kharraz *et al.*, “Desalination for Agriculture: Is It Affordable?”, en *Biosaline Agriculture as a Climate Change Adaptation for Food Security*, Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 377-395, doi: 10.1007/978-3-031-24279-3_16.
- [24] J. Kim *et al.*, “A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants”, *Appl Energy*, vol. 254, p. 113652, nov. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113652.
- [25] H. Nassrullah, S. F. Anis, R. Hashaikeh, and N. Hilal, “Energy for desalination: A state-of-the-art review”, *Desalination*, vol. 491, p. 114569, oct. 2020, doi: 10.1016/j.desal.2020.114569.
- [26] D. Curto, V. Franzitta, and A. Guercio, “A Review of the Water Desalination Technologies”, *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, p. 670, ene. 2021, doi: 10.3390/app11020670.
- [27] M. A. M. Khan, S. Rehman, and F. A. Al-Sulaiman, “A hybrid renewable energy system as a potential energy source for water desalination using reverse osmosis: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 97, pp. 456-477, dic. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.049.
- [28] J. Bundschuh *et al.*, “State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects”, *Desalination*, vol. 508, p. 115035, jul. 2021, doi: 10.1016/j.desal.2021.115035.
- [29] H. Mehrjerdi, and A. A. M. Aljabery, “Modeling and Optimal Planning of an Energy-Water-Carbon Nexus System for Sustainable Development of Local Communities”, *Adv Sustain Syst*, vol. 5, no. 7, jul. 2021, doi: 10.1002/adsu.202100024.
- [30] Organización de Naciones Unidas (ONU), “Objetivos de Desarrollo Sostenible”. [En línea]. Disponible en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [31] Y. García-Vera, R. Dufo-López, and J. Bernal-Agustín, “Optimization of Isolated Hybrid Microgrids with Renewable Energy Based on Different Battery Models and Technologies”, *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 3, p. 581, ene. 2020, doi: 10.3390/en13030581.
- [32] A. Ahmed, E. Pomodakis, and T. Massier, “Optimal Operation of Islanded AC/DC Hybrid Microgrids”, en 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), IEEE, jul. 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM46819.2021.9638147.
- [33] P. Li, W. Sheng, and Q. Duan, “Optimal Power Flow Calculation Method for AC/DC Hybrid Distribution Network Based on Power Router”, en 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), IEEE, abr. 2021, pp. 1694-1699, doi: 10.1109/ACPEE51499.2021.9436952.
- [34] D. Pullaguram *et al.*, “Optimal Power Flow in AC/DC Microgrids With Enhanced Interlinking Converter Modeling”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 3, no. 3, pp. 527-537, jul. 2022, doi: 10.1109/JESTIE.2022.3145747.
- [35] M. M.-U.-T. Chowdhury *et al.*, “SOCP Based Novel OPF Analysis Model for AC-DC Hybrid Power Distribution Networks”, en 2023 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE), IEEE, dic. 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/PESGRE58662.2023.10404317.

- [36] S. Paul, and N. Prasad Padhy, “A new iterative mixed integer linear programming based real time energy efficient management of AC-DC distribution networks”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 157, p. 109793, jun. 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109793.
- [37] Y. Zhu *et al.*, “Optimal power flow research of AC-DC hybrid grid with multiple energy routers”, *Electric Power Systems Research*, vol. 228, p. 110090, mar. 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2023.110090.
- [38] Q. Li *et al.*, “Micro Water-Energy Nexus: Optimal Demand-Side Management and Quasi-Convex Hull Relaxation”, *IEEE Trans Control Netw Syst*, vol. 6, no. 4, pp. 1313-1322, dic. 2019, doi: 10.1109/TCNS.2018.2889001.
- [39] K. Oikonomou, and M. Parvania, “Optimal Coordinated Operation of Interdependent Power and Water Distribution Systems”, *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 11, no. 6, pp. 4784-4794, nov. 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.3000173.
- [40] C. Wang *et al.*, “Robust Operation of a Water-Energy Nexus: A Multi-Energy Perspective”, *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 11, no. 4, pp. 2698-2712, oct. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2020.2971259.
- [41] P. Zhao *et al.*, “Water-Energy Nexus Management for Power Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 3, pp. 2542-2554, may 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3038076.
- [42] M. P. Meneses, A. F. Jaimes, and J. V. Quintana, “An optimized management model of the resources embedded on an isolated water-energy microgrid for a Ranchería”, en 2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), IEEE, oct. 2021, pp. 98-103, doi: 10.1109/CCAC51819.2021.9633297.
- [43] M. P. Meneses, A. F. Jaimes, and J. V. Quintana, “Water-energy nexus and stochastic optimization in a isolated microgrid: application in arid zones of La Guajira in Colombia”, en 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), IEEE, oct. 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960560.
- [44] E. B. Gómez-Gardars *et al.*, “Assessment of the water-energy-carbon nexus in energy systems: A multi-objective approach”, *Appl Energy*, vol. 305, p. 117872, ene. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117872.
- [45] S. Tan, and L. Yao, “Managing and optimizing urban water supply system for sustainable development: Perspectives from water-energy-carbon nexus”, *Sustain Prod Consum*, vol. 37, pp. 39-52, may. 2023, doi: 10.1016/j.spc.2023.02.004.
- [46] P. Zhao *et al.*, “Managing Water-Energy-Carbon Nexus for Urban Areas With Ambiguous Moment Information”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 5, pp. 4432-4446, sep. 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3214189.
- [47] S. H. Low, “Convex Relaxation of Optimal Power Flow-Part I: Formulations and Equivalence”, *IEEE Trans Control Netw Syst*, vol. 1, no. 1, pp. 15-27, mar. 2014, doi: 10.1109/TCNS.2014.2309732.
- [48] A. Valencia, R. A. Hincapie, and R. A. Gallego, “Optimal location, selection, and operation of battery energy storage systems and renewable distributed generation in medium-low voltage distribution networks”, *J. Energy Storage*, vol. 34, p. 102158, feb. 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102158.
- [49] H. M. A. Ahmed, A. B. Eltantawy, and M. M. A. Salama, “A Generalized Approach to the Load Flow Analysis of AC-DC Hybrid Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 2117-2127, mar. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2720666.
- [50] Z. Sabzian, E. Rokrok, and M. Doostizadeh, “A unified power flow approach using vsc-efficiency for AC-DC distribution systems operating at grid connected and islanded modes”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 130, p. 106906, sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106906.
- [51] H. Mehrjerdi *et al.*, “Carbon-Constrained and Cost Optimal Hybrid Wind-Based System for Sustainable Water Desalination”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 84079-84092, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3087540.
- [52] A. Valencia-Díaz, “Datos del sistema de prueba híbrido AC/DC de 15 nodos considerando el nexo energía-agua-carbono”. [En línea]. Disponible en <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1zCEspRYDOvDEENt26VsCYinkUofFWsE9/edit?usp=sharing&ouid=117501612978165910753&rtop=true&sd=true>



Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91182133004>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la
academia

Alejandro Valencia Díaz, Ramón Alfonso Gallego Rendón,
Eliana Mirledy Toro Ocampo

**Flujo de potencia óptimo en sistemas de distribución AC/
DC bajo un enfoque de nexo energía-agua-carbono para el
desarrollo sostenible de comunidades aisladas***

**Optimal Power Flow in AC/DC Distribution Systems Under
an Energy- Water-Carbon Nexus Approach for the
Sustainable Development of Isolated Communities**

**Fluxo de potência ideal em sistemas de distribuição AC/
DC sob uma abordagem de nexo energia-água-carbono
para o desenvolvimento sustentável de comunidades
isoladas**

Ciencia e Ingeniería Neogranadina

vol. 34, núm. 2, p. 43 - 61, 2024

Universidad Militar Nueva Granada,

ISSN: 0124-8170

ISSN-E: 1909-7735

DOI: <https://doi.org/10.18359/rcin.7272>