Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.07
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Una revisión del desarrollo de la hidroelectricidad en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue

Hydropower Development in Ethiopia, Tanzania, Zambia, and Zimbabwe: A Comprehensive Review

Sebastián Naranjo-Silva[1,*]

Recibido: 25-09-2024, Recibido tras revisión: 06-05-2025, Aceptado: 10-05-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen

Todos los continentes están atravesando actualmente transiciones energéticas hacia economías bajas en carbono, impulsadas por las fuentes renovables. Uno de estos continentes es África, donde la población y el crecimiento económico representan una quinta parte del total mundial. Si bien el continente africano tiene la menor responsabilidad por el calentamiento global —con menos del 3 % de las emisiones—, ya enfrenta severos impactos del cambio climático. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo analizar el desarrollo hidroeléctrico en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, con el fin de examinar el uso de esta fuente renovable y sus proyecciones. Estos países fueron seleccionados debido a su amplia proyección hidroeléctrica. En ellos, se ha invertido una cantidad significativa en hidroelectricidad; sin embargo, el impacto del cambio climático aumenta el riesgo de sequías, lo cual genera preocupación debido a las variaciones en los patrones climáticos. Las compañías eléctricas no solo necesitan pronosticar la generación futura de energía, sino que también adoptar medidas de mitigación y adaptación para mantener sus inversiones. Además, el cambio climático es un parámetro externo que desempeña un papel importante al proporcionar datos de referencia para futuros proyectos, por lo que es necesario evaluar las operaciones de energía hidroeléctrica y los embalses en función de un conjunto de variables (temperatura, precipitación, humedad, caudal de los ríos, cuencas, entre otros).

Palabras clave: África, energía hidroeléctrica, proyecciones, sostenible

Abstract

All continents are currently undergoing energy transitions toward low-carbon economies driven by renewable technologies. Africa is no exception; with its rapidly growing population and expanding economy, it represents nearly one-fifth of the global demographic. Although the African continent contributes less than 3% of global carbon emissions, it is already experiencing severe and disproportionate impacts from climate change. This manuscript aims to analyze hydropower development in Ethiopia, Tanzania, Zambia, and Zimbabwe, with the objective of assessing the current use of this renewable energy resource and its project role. These countries were selected due to their significant hydroelectric potential and ongoing investment in renewable energy infrastructure. While these nations have made substantial commitments to hydropower, climate-induced shifts in hydrological patterns, particularly increased drought risk, pose serious challenges to energy security and sustainability. Consequently, electric utilities must not only forecast project future energy generation but also implement robust mitigation and adaptation strategies to safeguard long-term investments. Given the critical role of climate change as an external variable influencing energy planning, it is essential to evaluate hydropower generation and reservoir operations through a multidimensional framework that includes parameters such as temperature, precipitation, humidity, river flow, watershed characteristics, and other related factors.

Keywords: Africa, hydroelectric energy, projections, sustaninability

[1,*]Departamento de Sostenibilidad, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
Autor para correspondencia ✉: hector.sebastian.naranjo@upc.edu.

Forma sugerida de citación: S. Naranjo-Silva, "Una revisión del desarrollo de la hidroelectricidad en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 34, pp. 89-102, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.07.

1. Introducción

A nivel global, los sistemas eléctricos basados en energías renovables desempeñan un papel cada vez más crítico en la mejora del acceso a la energía, especialmente en regiones rurales y remotas donde la disponibilidad de electricidad sigue siendo limitada. Según el Informe sobre el estado global de las energías renovables, la inversión mundial en capacidad de energía renovable aumentó en un 2 % en 2020, lo que demuestra resiliencia frente a las disrupciones económicas causadas por la pandemia de COVID-19. Los sistemas de energía renovable distribuida han seguido ampliando el acceso, llegando a contribuir con hasta el 10 % de la generación eléctrica en algunos países [1].

En 2020, la inversión mundial en energía renovable y combustibles, excluidos los proyectos hidroeléctricos mayores a 50 MW, totalizó USD 303,5 mil millones. Por sexto año consecutivo, las economías en desarrollo y emergentes superaron a los países desarrollados en inversión en capacidad de energía renovable, alcanzando un total combinado de USD 153,4 mil millones. Ese mismo año, la financiación en las economías desarrolladas aumentó un 13 %, mientras que la inversión en los mercados emergentes disminuyó un 7 %, lo que refleja tendencias más amplias en el financiamiento global de energía renovable, también excluidos los proyectos hidroeléctricos a gran escala [2, 3].

Centrándose específicamente en la energía hidroeléctrica, que sigue siendo la principal fuente entre las tecnologías renovables, la Asociación Internacional de Hidroelectricidad (IHA, por sus siglas en inglés) informó que la generación hidroeléctrica mundial alcanzó un estimado de 4252 TWh en 2021, tras un aumento del 1,9 % en 2020. A pesar de los efectos disruptivos de la recesión inducida por la pandemia, que afectó a muchos de los principales proveedores mundiales de tecnología hidroeléctrica, el mercado hidroeléctrico global continuó creciendo. Cabe destacar que China representó más de la mitad de todas las nuevas incorporaciones de capacidad en 2021, contribuyendo con un aumento de 20840 MW [4].

Sin embargo, el uso de energía renovable está aumentando en todos los sectores económicos, lo que refleja una dependencia creciente de la electricidad para satisfacer las demandas sociales e industriales. Según el grupo REN21, gran parte del progreso reciente en la expansión de la participación de las energías renovables en la producción eléctrica mundial ha dado como resultado que las renovables contribuyeran con casi un tercio (30 %) de la generación total de electricidad en 2022 [5], como se muestra en la Figura 1.

La Figura 1 ilustra que la energía hidroeléctrica continúa siendo una fuente principal entre las tecnologías de energía renovable, y que se prevé que la industria enfrente tanto desafíos como oportunidades en los próximos años. Estos desafíos incluyen limitaciones operativas y técnicas; problemas de aceptación ambiental y social; la disminución de los precios mayoristas de la electricidad a escala global, y los impactos climáticos adversos, todos los cuales afectan directamente la generación hidroeléctrica [6, 7].

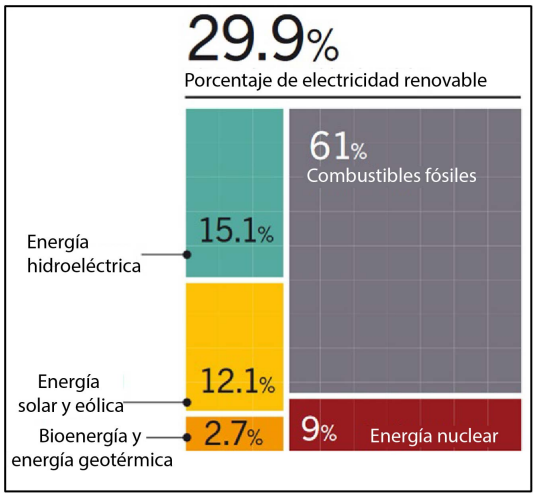

Figura 1. Composición de la red energética global [5]

La inversión en el desarrollo de la energía hidroeléctrica genera beneficios económicos significativos, al acelerar el crecimiento y contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La energía hidroeléctrica desempeña un papel fundamental en el avance de las tecnologías de energía limpia dentro de las economías nacionales, razón por la cual este artículo examina el estado actual y el potencial futuro de esta fuente en determinados países africanos [8].

Actualmente, casi el 40 % de la población en África carece de acceso a la electricidad, y la mayoría de los afectados vive en el África subsahariana. Países como Ghana, Kenia y Ruanda están en camino de lograr el acceso universal a la electricidad para 2030, sirviendo como ejemplo para que otros los sigan. África también tiene el consumo per cápita más bajo de energía moderna en el mundo, particularmente de fuentes renovables. A medida que la población y los niveles de ingreso continúan aumentando, se espera que la demanda de energía moderna crezca en un tercio entre 2020 y 2030, según el Escenario de África Sostenible. Paralelamente, varios países africanos se han comprometido a reducir las emisiones en aproximadamente 550 Mt CO_2 para 2030, lo que equivale al 40 % de las emisiones actuales del continente [9, 10].

En África, la energía hidroeléctrica representa actualmente aproximadamente el 17 % de la generación total de electricidad. En algunos países, incluidos la República Democrática del Congo, Etiopía, Malawi, Mozambique, Uganda y Zambia, la energía hidroeléctrica suministra hasta el 80 % del consumo total de energía [11]. Según el Banco Mundial, se espera que la capacidad hidroeléctrica instalada de África

alcance aproximadamente los 40 gigavatios (GW) para 2030 [12]. Sin embargo, cerca del 25 % de las plantas existentes no están operativas debido al mantenimiento deficiente y a la infraestructura inadecuada. Además, la Asociación Internacional de Hidroelectricidad (IHA, por sus siglas en inglés) estima que el continente tiene una cartera de desarrollo de 117 GW y un potencial hidroeléctrico restante de 478 GW [13].

Según datos de organizaciones dedicadas a la recopilación de información sobre energías renovables, particularmente hidroeléctrica, esta fuente de energía es generalmente percibida de manera positiva debido a su dependencia de recursos naturales inagotables. Sin embargo, la energía hidroeléctrica también conlleva impactos ambientales y sociales que deben ser considerados cuidadosamente. Este manuscrito tiene como objetivo analizar el desarrollo de la energía hidroeléctrica en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue (Figura 2), enfocándose en su uso actual y sus proyecciones futuras, mediante una revisión exhaustiva de documentos relevantes y políticas del sector energético. Estos países fueron seleccionados con base en los datos disponibles que indican su significativo potencial hidroeléctrico. Además, se consultaron múltiples fuentes de investigación para apoyar y consolidar la información presentada en esta revisión.

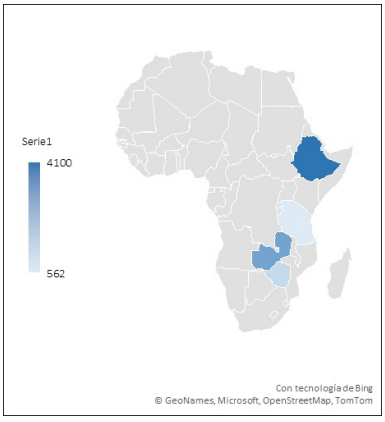

Figura 2. Países seleccionados para este estudio [14]

2. Materiales y métodos

Para analizar el desarrollo de la energía hidroeléctrica en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, la metodología se inicia con una revisión exhaustiva de la literatura y documentos, guiada por un enfoque investigativo. Este primer paso implica la recopilación de fuentes relevantes, incluidos estudios científicos, informes gubernamentales y documentos de políticas energéticas y ambientales específicos de los países seleccionados. La revisión se centra en estudios que abordan tanto el desarrollo hidroeléctrico como los impactos del cambio climático en la región, con énfasis en publicaciones recientes, preferiblemente de los últimos cinco años, para garantizar relevancia y actualidad. Se da prioridad a fuentes confiables, como bases de datos académicas, informes de organizaciones internacionales y documentos oficiales gubernamentales.

El segundo paso de la metodología implica un análisis detallado de las políticas energéticas y los marcos regulatorios de cada país. Este análisis tiene como objetivo evaluar cómo las políticas nacionales apoyan el desarrollo hidroeléctrico mediante la identificación de regulaciones ambientales clave, incentivos gubernamentales y estrategias de adaptación al cambio climático. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis comparativo para examinar las similitudes y diferencias en la integración de consideraciones climáticas en las políticas energéticas nacionales, aspecto que resulta esencial para comprender el contexto más amplio en el que se están desarrollando los proyectos hidroeléctricos.

El tercer paso consiste en evaluar los principales proyectos hidroeléctricos en los países seleccionados. Este análisis incluye la recopilación de datos sobre la capacidad instalada de cada proyecto, la configuración tecnológica, la producción energética anual y las proyecciones de generación futura. Además, se evalúan la eficiencia y la sostenibilidad de estos proyectos, considerando su vulnerabilidad a la variabilidad climática, en particular a los fenómenos como sequías y cambios en los patrones de precipitación, los cuales se están volviendo cada vez más frecuentes debido al cambio climático.

El cuarto paso de la metodología consiste en un estudio de caso comparativo de los cuatro países seleccionados, presentado en la sección de discusión. Este enfoque facilita la evaluación de los desafíos y logros de cada país en el desarrollo de la energía hidroeléctrica en un contexto de condiciones climáticas cambiantes. Se emplean métodos tanto cualitativos como cuantitativos para analizar las experiencias nacionales, con un enfoque particular en las mejores prácticas y las enseñanzas extraídas.

En general, este artículo describe la metodología utilizada para seleccionar y analizar documentos científicos, proporcionando un detalle de las palabras clave aplicadas: “desarrollo hidroeléctrico en África”, “desarrollo hidroeléctrico en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue” y “matriz energética en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue”. También se especifican las cadenas de búsqueda empleadas, las bases de datos y bibliotecas digitales consultadas —incluidas Scopus, Web of Science y otras fuentes relevantes para la investigación en energía hidroeléctrica—, así como el período de revisión bibliográfica, que abarca desde 2017 hasta 2024.

Finalmente, se discutirán los resultados, ya que la validación es esencial para asegurar la fiabilidad y relevancia de las conclusiones del estudio. La combinación de estos pasos metodológicos proporciona una base sólida y rigurosa para analizar el estado actual y

las perspectivas futuras de la energía hidroeléctrica en estos países africanos, dentro del contexto más amplio del acelerado cambio climático.

3. Resultados y discusión

Según datos de British Petroleum, la generación hidroeléctrica por continente en 2021 muestra que Asia produjo la mayor proporción, generando 2176 TWh. Esta tendencia al alza se ha mantenido desde 2003. En comparación, las Américas gestaron 1239 TWh, Europa produjo 659 TWh y África generó solo 146 TWh, lo que indica una producción significativamente menor. Al comparar la generación de África con la de Asia [15], el continente representó solo el 7 % de la producción hidroeléctrica asiática, lo que confirma a África como la región con el nivel más bajo de desarrollo hidroeléctrico en 2021 [16]. Como se muestra en la Figura 3, el desarrollo hidroeléctrico global en 2021 está representado por la capacidad instalada total en las diferentes regiones.

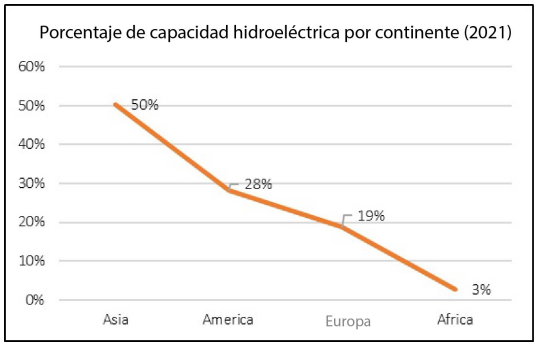

Figura 3. Capacidad instalada hidroeléctrica global por continente en 2021

Como se muestra en la Figura 3, la capacidad instalada de energía hidroeléctrica en 2021 varió significativamente entre continentes, con Asia liderando con 655 GW, seguida por las Américas con 382 GW, Europa con 254 GW y África con solo 38 GW. Estas cifras revelan disparidades sustanciales en el desarrollo hidroeléctrico, particularmente en regiones con infraestructura energética limitada. África presenta oportunidades considerables para la expansión de esta fuente clave de energía renovable [15], [17]. Además, el estudio incluye una figura que muestra los 18 principales países africanos por capacidad hidroeléctrica instalada, incluyendo almacenamiento por bombeo, así como los países seleccionados para esta revisión.

Como se muestra en las Figuras 3 y 4, el desarrollo hidroeléctrico presenta variaciones significativas entre continentes y entre los países africanos. Basándose en estas disparidades, este estudio se centra en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, seleccionados por su elevado potencial de desarrollo hidroeléctrico y crecimiento proyectado. Para apoyar este análisis, se revisaron diversas fuentes de investigación con el fin de consolidar información relevante y evaluar el estado actual y el potencial futuro de la energía hidroeléctrica en los países seleccionados.

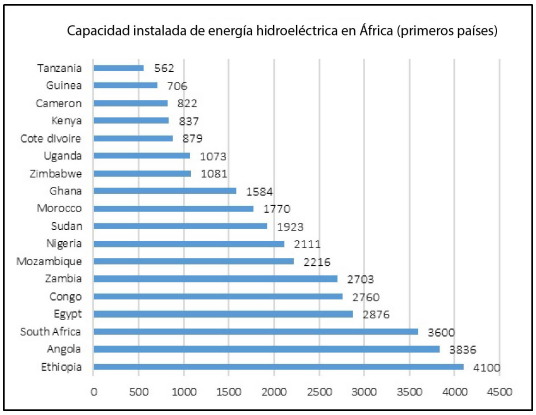

Figura 4. Capacidad instalada hidroeléctrica en África [4]

Etiopía

Etiopía es un país en desarrollo, dotado de abundantes recursos hídricos. Como resultado, su capacidad de generación hidroeléctrica aumentó de 850 MW en 2010 a 4100 MW en 2021. En la actualidad, el Gobierno ejecuta varios proyectos hidroeléctricos de gran envergadura, con el objetivo de posicionar a Etiopía como un centro energético clave en África Oriental. Entre estos proyectos destacan la planta hidroeléctrica Gibe III, construida en el río Omo-Gibe, con una capacidad de 1870 MW, y la Gran Presa del Renacimiento Etíope, ubicada en el río Abay, con una capacidad de 6000 MW [18, 19].

El desarrollo hidroeléctrico ha sido priorizado como un motor clave del crecimiento económico en Etiopía. No obstante, para asegurar la eficiencia óptima de los embalses existentes y planificados, es fundamental evaluar los impactos potenciales de la expansión hidroeléctrica. Los cambios continuos en la temperatura, la precipitación y los patrones de caudal afectan cada vez más los esquemas hidroeléctricos, influyendo en los horizontes de diseño de las presas y embalses, así como en sus ciclos operativos [20, 21]. Además, las normas de operación de embalses se aplican ampliamente para guiar la gestión efectiva de los sistemas hidroeléctricos [22]. En consecuencia, se han realizado varios estudios relevantes que se citan en esta revisión.

Mekonnen et al. [23] analizaron el desarrollo hidroeléctrico en Etiopía y concluyeron que el país ya experimenta los efectos adversos de las sequías inducidas por el cambio climático, las cuales impactan negativamente sus recursos hidroeléctricos. Para mitigar estos efectos, se requeriría un aumento del 30 % en la capacidad instalada total para compensar una

reducción anticipada del 50 % en la producción de las plantas hidroeléctricas. Según las proyecciones, para 2065, el suministro eléctrico de Etiopía estará compuesto por un 9 % de energía hidroeléctrica, 13 % de energía nuclear, 3,4 % de fuelóleo pesado, 7 % de energía geotérmica, 6 % de energía eólica y 5 % de biomasa. A pesar de la creciente diversificación de la matriz energética, se espera que la energía hidroeléctrica siga siendo la fuente dominante de generación eléctrica hasta 2057, representando el 25,2 % de la producción total.

Un análisis prospectivo del nexo energía-agua indica que la rápida construcción de grandes presas hidroeléctricas impone costos ambientales a las comunidades río abajo al alterar los patrones naturales de flujo. Los escenarios de simulación del análisis revelan que, entre las vías de desarrollo hidroeléctrico de Etiopía, se requieren dos enfoques de modelado distintos para alcanzar las salidas proyectadas de 71 y 87 TWh por año para 2050, bajo un escenario de mitigación del cambio climático. Estos hallazgos subrayan la necesidad de aumentar significativamente la capacidad instalada en Etiopía para contribuir de manera significativa a los esfuerzos globales destinados a alcanzar la meta de 2 °C del Acuerdo de París [24]. Para comparación, la producción hidroeléctrica de Etiopía fue de aproximadamente 21 TWh por año en 2022 [4].

Mirani et al. [25] evaluaron el potencial hidroeléctrico del embalse Kesem, que abarca un área de 2974 km ^{2}. El estudio aplicó las Rutas Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés), específicamente RCP4.5 y RCP8.5, para evaluar los impactos climáticos proyectados a corto y largo plazo. Bajo RCP4.5, la producción máxima estimada de energía es de 376,2 MWh a corto plazo y 370,5 MWh a largo plazo. Bajo RCP8.5, los valores correspondientes son 368,6 MWh y 363,5 MWh, respectivamente. Cabe destacar que la línea base original para la generación hidroeléctrica se proyectó en 380 MWh [25].

Investigaciones adicionales respaldan estos hallazgos, demostrando que la variabilidad climática en 200 localidades de la subcuenca del Nilo en Etiopía podría generar cambios en la precipitación que oscilen entre –14 % y +27 % para 2050. Estos resultados subrayan la significativa vulnerabilidad de la infraestructura hidroeléctrica a gran escala ante eventos climáticos impredecibles, incluidos costos tangibles e intangibles asociados con la construcción [26].

La red de transmisión de Etiopía está experimentando una expansión y modernización significativas para respaldar los ambiciosos objetivos de electrificación del país. El Gobierno ahora apunta a lograr el acceso universal a la electricidad para 2030, revisando su objetivo anterior de 2025, con planes para conectar al 96 % de la población a la red nacional para ese año. La infraestructura de transmisión se está reforzando mediante la construcción de nuevas subestaciones, la mejora de las líneas de transmisión y la modernización de los sistemas de red para acomodar cargas incrementadas e integrar fuentes variables de energía renovable [27, 28].

Etiopía posee un potencial hidroeléctrico sustancial, con un excedente significativo disponible para exportación. Sin embargo, la mayoría de la población reside en áreas remotas con acceso limitado a la electricidad. Actualmente, el país genera aproximadamente 4 GW de electricidad a partir de 11 plantas hidroeléctricas grandes y 7 pequeñas. Para lograr el acceso universal a la electricidad, la política energética nacional debería priorizar la hidroeléctrica a pequeña escala, que podría ofrecer una solución más práctica y descentralizada para satisfacer las necesidades energéticas rurales, al mismo tiempo que promueve el desarrollo económico en estas comunidades [29].

No obstante, la expansión de proyectos hidroeléctricos a gran escala en Etiopía ha generado preocupaciones entre los países vecinos, especialmente aquellos dependientes del río Nilo. Por ejemplo, Egipto se ha opuesto firmemente a estos desarrollos, citando posibles alteraciones a sus derechos históricos sobre el agua.

Tanzania

Tanzania, ubicada en África Oriental, es conocida por su diversidad cultural, sus parques nacionales y su rico patrimonio histórico. Una de las principales fortalezas del país radica en su abundancia de recursos energéticos renovables. En consecuencia, Tanzania ha aprovechado con éxito diversas fuentes, entre ellas biomasa, energía hidroeléctrica, geotérmica, solar y eólica. Según la Guía de Recursos Energéticos 2021, la capacidad total instalada de generación eléctrica del país era de 1602 MW. De este total, se añadieron 244 MW en los cuatro años anteriores, con la capacidad distribuida de la siguiente manera: energía hidroeléctrica, 568 MW; térmica, 951,6 MW; y otras fuentes renovables, 82,4 MW [30].

La generación eléctrica de Tanzania proviene principalmente de gas natural (48 %), energía hidroeléctrica (31 %), petróleo (18 %), energía solar (1 %) y biocombustibles (1 %). Esta matriz energética ha contribuido a mejorar el acceso a la electricidad, alcanzando al 36,4 % de la población urbana y al 11 % de la población rural [31]. Sin embargo, la continua dependencia del país de la energía hidroeléctrica, combinada con sequías frecuentes, a menudo provoca cortes de energía. Además, el consumo promedio per cápita de electricidad en Tanzania sigue siendo bajo, con 108 kWh al año, en comparación con el promedio mundial de 2500 kWh anuales [30].

Según Baraka Kichonge [32], Tanzania se encuentra entre las economías de más rápido crecimiento en

África. Para satisfacer sus crecientes demandas energéticas, el país requiere electricidad asequible, limpia y, sobre todo, sostenible. Aunque la generación térmica continúa dominando la producción eléctrica global, Tanzania posee un potencial hidroeléctrico sustancial, estimado en 38 000 MW. Sin embargo, hasta 2021, solo se había desarrollado una pequeña parte de este potencial, con una capacidad instalada de apenas 562 MW [4], [32].

Las investigaciones indican que, en Tanzania, la construcción de plantas hidroeléctricas y embalses tiene efectos que van más allá de los impactos ambientales directos. Estos desarrollos suelen requieren el reasentamiento de comunidades y el desplazamiento de la fauna silvestre, lo que subraya la competencia por los recursos hídricos entre las poblaciones locales y los operadores hidroeléctricos. Además, la expansión de la infraestructura asociada a estos proyectos está frecuentemente vinculada al aumento de la deforestación [33].

Por otro lado, el potencial hidroeléctrico no aprovechado de Tanzania, respaldado por estudios de factibilidad que estiman aproximadamente 4765 MW para desarrollo a corto y mediano plazo, debe evaluarse dentro del contexto más amplio de una red energética integrada que incorpore diversas fuentes renovables. Sin embargo, los frecuentes desafíos climáticos pueden afectar negativamente los proyectos hidroeléctricos de gran y mediana escala. La investigación destaca el importante papel que las plantas hidroeléctricas a pequeña escala pueden desempeñar tanto en la generación de electricidad como en la conservación ambiental [32].

Kadigi et al. [34], en un estudio sobre el río Great Ruaha en Tanzania, evaluaron el valor del agua en campos de arroz irrigados y en la generación hidroeléctrica utilizando un modelo de imputación residual. La productividad estimada del agua (PW) en arroz irrigado varió de 0,126 a 0,265 kg/m^3, mientras que en la generación hidroeléctrica osciló entre 0,45 y 1,68 kWh/m^3. Estos resultados destacan la importancia de evaluar el valor del agua en sus usos alternativos para orientar una gestión y asignación efectiva de los recursos.

England [35] enfatiza, además, la necesidad de integrar las decisiones sobre el uso del agua entre sectores, particularmente en economías basadas en la agricultura. En tales contextos, la reasignación de recursos puede resultar en transferencias sustanciales desde la agricultura hacia sectores con mayores retornos económicos, como la hidroeléctrica y la producción industrial, potencialmente maximizando los resultados favorables para los sectores más pobres [34, 35].

Tanzania está expandiendo activamente su red energética y de transmisión para satisfacer la creciente demanda, con un enfoque en la integración de fuentes de energía renovable y el fortalecimiento de las interconexiones regionales. Sin embargo, las condiciones actuales varían considerablemente en todo el país debido a las disparidades económicas regionales, lo que afecta el ritmo y la efectividad del desarrollo de infraestructura [36, 37].

Dada su posición geográfica y su considerable potencial hidroeléctrico, Tanzania está bien posicionada para aprovechar recursos energéticos limpios y nacionales. Estos recursos pueden desempeñar un papel significativo en el avance de los objetivos nacionales de desarrollo y en la mitigación de los efectos del cambio climático. No obstante, para asegurar un progreso sostenible, es esencial que las iniciativas hidroeléctricas proporcionen beneficios significativos y equitativos tanto a las comunidades locales como al medioambiente, apoyando así el crecimiento a largo plazo en la generación sostenible de electricidad.

Zambia

En 2020, la capacidad energética total instalada en Zambia alcanzó los 2800 MW, de los cuales la energía hidroeléctrica representó 2380 MW, es decir, el 85 % del total. En 2019, la generación hidroeléctrica sumó 13 678 GWh [38]. La energía hidroeléctrica es un componente clave del sistema energético de Zambia debido a su naturaleza limpia y renovable, así como a su eficacia en la regulación de la frecuencia eléctrica. Zambia, un país sin salida al mar en el sur de África, limita con ocho naciones vecinas. Su ubicación cercana al ecuador le confiere un clima tropical, con precipitaciones anuales que varían aproximadamente entre 600 mm en el sur y 1400 mm en el norte. Diciembre y enero son típicamente los meses más lluviosos. En los últimos años, el país ha enfrentado con mayor frecuencia eventos climáticos extremos, incluidos sequías recurrentes e inundaciones [11], [39].

Sin embargo, investigaciones realizadas por Mudenda et al. [40] indican que los ciclos climáticos variables están teniendo efectos cada vez más adversos sobre los ríos, arroyos e infraestructura de Zambia. En los últimos años, el país ha enfrentado un déficit creciente de electricidad debido a cortes persistentes en el suministro. Para 2019, más de 1,9 millones de hogares (57,6 %) carecían de acceso a la electricidad, y más del 96 % de la población rural aún no estaba electrificada. Estas cifras resaltan la urgente necesidad de abordar el acceso energético y de implementar estrategias de electrificación sostenible.

Chirwa et al. [41] señalan que, a medida que la población de Zambia crece, también aumenta la demanda de servicios energéticos, especialmente de electricidad. Se espera que esta demanda crezca significativamente, con una población proyectada de 26,9 millones para 2035. Estadísticamente, el consumo energético está aumentando a una tasa estimada del 6 % anual, impulsado por factores demográficos y

socioeconómicos [41]. Para 2020, la mezcla de generación energética del país incluía carbón (10,96 %), fuelóleo pesado (3,65 %), diésel (2,78 %) y solar (2,96 %) [41, 42].

Winton et al. [43] analizaron la cuenca del río Zambezi en el sur de África, una región que experimenta un rápido desarrollo y crecimiento poblacional. La intensificación agrícola, la expansión urbana y la planificación de nuevos proyectos hidroeléctricos probablemente afectarán la calidad del agua superficial. Sin embargo, existen pocas evaluaciones integrales que identifiquen dónde, cómo y por qué ciertos parámetros de calidad del agua están siendo afectados, especialmente utilizando datos *in situ* a gran escala. Para cubrir esta brecha, Winton llevó a cabo cuatro campañas de campo en 2018 y 2019, muestreando diversos parámetros biogeoquímicos de la calidad del agua en 14 sitios distribuidos en el centro y sur de Zambia.

Los resultados indican que, aunque los principales ríos Zambezi y Kafue presentan bajas concentraciones de solutos y generalmente están limpios, sufren alteraciones térmicas, hipoxia y disminución de sedimentos en suspensión aguas abajo de las presas. Zambia alberga actualmente varios grandes proyectos hidroeléctricos en estos ríos, con una capacidad potencial combinada que supera los 2800 GWp, y se están haciendo estudios de factibilidad adicionales. Aunque esta infraestructura es fundamental para fortalecer la red energética nacional y promover el desarrollo de energía limpia, se recomienda que estos proyectos cumplan con criterios de desarrollo sostenible para minimizar los impactos ambientales [43, 44].

La red eléctrica de Zambia depende en gran medida de la energía hidroeléctrica. El país está expandiendo y modernizando activamente su infraestructura de transmisión para minimizar las pérdidas de energía y mejorar la confiabilidad, a menudo en coordinación con los sistemas regionales de energía. Los informes indican que Zambia ha logrado una baja tasa de pérdida en la transmisión de solo el 4 %, y su red nacional ahora cubre casi todo el país [45, 46].

Al mismo tiempo, el país enfrenta crecientes riesgos de degradación de la calidad del agua debido a la intensificación agrícola, la urbanización y el continuo desarrollo de la energía hidroeléctrica. Para abordar estos desafíos, es esencial que el Gobierno de Zambia invierta en infraestructura sostenible y prácticas de gestión ambiental. Estas incluyen sistemas de tratamiento de aguas residuales, operaciones ecológicamente adecuadas de las presas y la protección de las áreas de cuenca hidrográfica para preservar la calidad del agua y la salud del ecosistema.

Zimbabue

Zimbabue ha logrado un progreso notable en el desarrollo de su infraestructura energética; sin embargo, este progreso no ha seguido el ritmo del crecimiento económico del país. Como resultado, Zimbabue continúa enfrentando un déficit energético, con una demanda nacional estimada de 2200 MW que aún no ha podido satisfacer [47, 48].

Dadas las condiciones climáticas favorables y la abundancia de cuerpos de agua, Zimbabue posee un potencial sustancial para el desarrollo de energía hidroeléctrica. Sin embargo, este potencial permanece en gran medida sin explotar, debido a la alta inversión de capital requerida y a una red de transmisión que no alcanza adecuadamente los sitios viables de generación. Además, la infraestructura envejecida y los frecuentes cortes de energía limitan aún más el acceso a la energía renovable. Los esfuerzos en curso para rehabilitar y expandir la red de transmisión tienen como objetivo mejorar tanto el acceso a la energía como la confiabilidad [49].

Según la Zimbabwe Power Company, la mayor parte de la electricidad del país se genera mediante plantas térmicas a carbón y proyectos hidroeléctricos, que son propiedad directa o indirecta de Zimbabwe Electricity Supply Authority (ZESA) Holdings. Sin embargo, debido a la limitada oferta nacional, causada por desafíos económicos y la insuficiente inversión en infraestructura clave, Zimbabue continúa importando electricidad de Sudáfrica, Namibia y Mozambique [50].

En Zimbabue, los bosques son esenciales tanto para absorber gases de efecto invernadero como para suministrar energía, particularmente en áreas rurales, donde el 94 % de la población depende del combustible de leña. Como resultado, conciliar la mitigación del cambio climático con los objetivos de seguridad energética y la ampliación del acceso a la electricidad representa un desafío complejo y urgente que requiere un análisis cuidadoso [47].

Maronga et al. [51] examinaron los efectos de la sequía en el suministro eléctrico de Zimbabue, enfocándose en la central termoeléctrica de Hwange. La sequía redujo la confiabilidad de la generación eléctrica, resultando en cortes de carga que impactaron negativamente las operaciones mineras dependientes de un suministro constante de energía. El estudio evaluó la viabilidad técnica y económica de desplegar energía solar concentrada con almacenamiento térmico, así como sistemas fotovoltaicos con almacenamiento en baterías, en un sitio minero en Zimbabue. Los resultados concluyeron que la integración del almacenamiento en baterías con un sistema fotovoltaico incrementa significativamente la proporción de la carga eléctrica cubierta por el sistema de energía renovable.

Ekandjo et al. [52], en un estudio realizado a lo largo del río Zambezi, dentro del reconocido Parque Nacio-

nal Mana Pools, observaron cambios ecológicos y morfológicos significativos durante la última década, como consecuencia de la construcción de presas hidroeléctricas río arriba. El estudio encontró que las operaciones de los embalses redujeron los caudales máximos promedio en un 17 % y aumentaron los caudales mínimos promedio en un 5 % en el área de Mana Pools [52]. Este análisis se centró en Zambia y Zimbabue, dos países del sur de África que comparten el río Zambezi. En 2021, Zambia reportó una capacidad hidroeléctrica instalada de 2703 MW, mientras que Zimbabue tenía 1081 MW [4].

El estudio también confirmó que las presas dentro y alrededor de ambos países presentan diversas vulnerabilidades. Para mitigar la alteración ecológica, el estudio recomienda alinear las operaciones hidroeléctricas con prácticas de manejo de vida silvestre, particularmente durante las liberaciones para control de inundaciones. Se encontró que las aperturas súbitas de compuertas perturban significativamente los ecosistemas, amenazando tanto a especies terrestres como acuáticas [52].

Spalding-Fecher et al. [53], en un estudio sobre el río Zambezi, destacan que los patrones de flujo de agua probablemente cambiarán en el futuro debido a los impactos significativos del cambio climático. Estos cambios tienen serias implicaciones para el potencial hidroeléctrico, ya que la viabilidad financiera y el pago de préstamos para proyectos relacionados dependerán de la estabilidad de la generación hidroeléctrica y de los ingresos por la venta de energía. Por ejemplo, se proyecta que la central hidroeléctrica de Kariba, compartida por Zambia y Zimbabue, será altamente vulnerable a escenarios climáticos secos, con una posible disminución promedio de la generación eléctrica del 12 % entre 2050 y 2070.

En Zimbabue, los esfuerzos por expandir la energía hidroeléctrica mediante sistemas renovables enfrentan diversos desafíos adicionales. La pandemia de COVID-19 ha provocado un aumento en los costos de infraestructura y una mayor demanda de terrenos, lo que ha llevado a que se dupliquen casi las estimaciones iniciales. Como resultado, mientras el país invierte gradualmente en nuevos proyectos de energía renovable, es esencial mantener operativas al máximo todas las plantas hidroeléctricas existentes.

3.1. Discusión

A nivel mundial, los continentes están en transición hacia economías bajas en carbono centradas en tecnologías de energía renovable. En África, el rápido crecimiento poblacional y el desarrollo económico están impulsando un aumento sustancial en la demanda eléctrica. En consecuencia, el desarrollo coordinado de la energía renovable ofrece una oportunidad estratégica para que el continente satisfaga sus crecientes necesidades energéticas, preservando al mismo tiempo la sostenibilidad ambiental [54].

Aunque el continente africano contribuye menos al calentamiento global, ya está enfrentando algunos de los impactos más severos del cambio climático. África alberga cerca de una quinta parte de la población mundial, pero es responsable de menos del 3 % de las emisiones globales de dióxido de carbono relacionadas con la energía, con las emisiones per cápita más bajas de cualquier continente [9].

Aunque los efectos adversos del cambio climático se sienten en toda África, países como Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue experimentan estos impactos de manera desproporcionada. Estos incluyen estrés hídrico, reducción en la producción de alimentos, eventos climáticos extremos más frecuentes y fluctuaciones en el crecimiento económico. A pesar de estos desafíos, es evidente que estas naciones deben continuar impulsando el desarrollo económico y social, mientras contribuyen a la transición global hacia la energía limpia [55, 56].

La energía hidroeléctrica es ampliamente considerada como una fuente de energía limpia y renovable que ofrece beneficios como el suministro de agua, el control de inundaciones, el crecimiento económico y la recreación [57]. Sin embargo, la relación entre la energía hidroeléctrica y factores ambientales externos se caracteriza por fluctuaciones constantes y, a menudo, impredecibles [58].

Comparando los resultados de Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue con proyecciones globales más amplias, Hamududu y Killingtveit [59] analizaron datos de 12 modelos globales de circulación y encontró que se esperan cambios significativos en el escurrimiento a nivel mundial. Por ejemplo, se proyectan grandes incrementos en Quebec, Canadá, mientras que se anticipan disminuciones notables en Turquía y Venezuela, regiones que previamente presentaban altos niveles de escurrimiento. Estos cambios probablemente tendrán un impacto directo en la generación hidroeléctrica debido a los patrones hidrológicos cambiantes. Los modelos sugieren, además, que para 2050 la producción hidroeléctrica podría disminuir aproximadamente un 0,48 % en el sur de África, 0,83 % en el norte de África, 1,43 % en Asia occidental y alrededor del 2 % en Europa.

En comparación con otros países, un estudio en India proyecta un aumento significativo de la temperatura de $6{,}25 \pm 1{,}62$ °C, lo que se espera reduzca los caudales de los ríos y afecte negativamente la producción hidroeléctrica durante mayo y junio, particularmente en las plantas Nathpa Jhakri y Bhakra Nangal, ambas ubicadas en regiones dominadas por nieve [60].

En América del Norte, también se anticipan reducciones en la producción hidroeléctrica, impulsadas principalmente por cambios hidrológicos más que por factores económicos como las recesiones. Esto

se debe a que los sistemas hidroeléctricos generalmente operan de forma continua cuando hay suficiente agua disponible; sin embargo, la creciente variabilidad climática está afectando la confiabilidad del caudal de los ríos [61].

No obstante, África posee el mayor potencial hidroeléctrico no explotado del mundo. Según un informe publicado en junio de 2022 por la International Hydropower Association, este potencial se estima en 474 gigavatios (GW), en comparación con 73 GW en Europa, 275 GW en Sudamérica, 387 GW en Norte y Centroamérica, 359 GW en Asia Oriental y el Pacífico, y 355 GW en Asia del Sur y Central. Aunque el potencial hidroeléctrico de África supera la demanda energética actual y a mediano plazo del continente, el costo de la electricidad generada por hidroeléctricas sigue siendo uno de los más bajos entre todas las fuentes renovables a nivel mundial [62, 63].

Por lo tanto, se recomienda que Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue coordinen el desarrollo de recursos hidroeléctricos factibles y consideren los hallazgos de diversos estudios, particularmente aquellos que abordan los impactos actuales y proyectados del cambio climático.

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables, se debe desarrollar una capacidad adicional de 850 GW de energía hidroeléctrica para 2050, con el fin de cumplir los objetivos climáticos establecidos en el Acuerdo de París. En 2020, 53 países africanos presentaron contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés) ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, comprometiéndose colectivamente a mitigar 550 millones de toneladas de CO_2, para 2030. Esta meta representa aproximadamente el 40 % de las emisiones actuales de dióxido de carbono del continente [9].

Además, el *Africa Energy Outlook* proyecta que, para 2030, las fuentes renovables, incluidas solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica, representarán más del 80 % de la nueva capacidad de generación eléctrica. Sin embargo, un tema clave que requiere atención es el desarrollo de las energías renovables no convencionales, particularmente la energía solar y geotérmica. Aunque África posee el 60 % de los recursos solares de mayor calidad en el mundo, representa solo el 1 % de la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica. La energía solar, ya considerada la fuente de energía más rentable en muchas regiones del continente, debe superar a todas las demás fuentes energéticas en África para 2030 con el fin de garantizar un desarrollo sostenible [64, 65].

Danso et al. [66] señalan que las centrales hidroeléctricas con grandes embalses se utilizan a menudo para apoyar la integración de cantidades significativas de energía renovable, a pesar de la variabilidad e intermitencia inherentes a estas fuentes. Una evaluación de grandes embalses hidroeléctricos en África Occidental indica que, cuando la demanda eléctrica aumenta en menos del 25 %, la contribución combinada de la energía solar y eólica a la generación total se mantiene por debajo del 20 %. Esto sugiere que el aumento de la demanda eléctrica puede generar inestabilidad en las redes energéticas, particularmente cuando depende de una mezcla compleja de renovables, combustibles fósiles y otras fuentes.

La red de transmisión energética en cada país desempeña un papel fundamental para permitir la entrega eficiente de electricidad desde las fuentes de generación, incluidas las renovables, hacia los centros de demanda, asegurando así un suministro eléctrico confiable. Para Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, una infraestructura de transmisión robusta y moderna es especialmente importante para apoyar el crecimiento económico, facilitar la integración de energías renovables y alcanzar las metas nacionales de desarrollo y electrificación. Los sistemas de transmisión inadecuados pueden generar cuellos de botella, aumentar las pérdidas energéticas y limitar la expansión del acceso, lo que, en última instancia, obstaculiza el progreso hacia los objetivos de desarrollo de cada país [67, 68].

Esta revisión destaca a la energía hidroeléctrica como una fuente de energía prometedora con un potencial significativo de desarrollo en toda África. El análisis, que se centra en Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, subraya la necesidad de una integración más amplia de criterios de sostenibilidad. Sin embargo, al cubrir solo cuatro de las 56 naciones africanas, la revisión ofrece una perspectiva limitada del panorama general de la energía hidroeléctrica en el continente.

4. Conclusiones

En Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, donde la energía hidroeléctrica ha recibido inversiones sustanciales, el cambio climático representa un desafío significativo debido a patrones hidrológicos cada vez más variables. Las empresas eléctricas en estos países deben no solo proyectar la producción energética futura, sino también implementar estrategias integrales de mitigación y adaptación para proteger la infraestructura. En todos los escenarios climáticos, las proyecciones indican una tendencia decreciente en la capacidad hidroeléctrica impulsada por la variabilidad climática.

En Etiopía, las preocupaciones sobre los derechos de aguas transfronterizas han generado tensiones regionales, particularmente con países como Egipto, que dependen en gran medida de las aguas del Nilo. Tanzania, en contraste, considera la energía hidroeléctrica como un motor clave para el desarrollo de energía limpia, dado su potencial para apoyar el crecimiento económico y reducir la vulnerabilidad al cambio climático.

En Zambia, la intensificación del desarrollo hidroeléctrico genera preocupaciones sobre la disminu-

ción de la calidad del agua, lo que resalta la necesidad de inversiones en infraestructura sostenible, tales como instalaciones de tratamiento de aguas residuales, operaciones de presas ambientalmente conscientes y zonas de protección de cuencas.

Mientras tanto, Zimbabue enfrenta crecientes desafíos relacionados con los altos costos de instalación, los requerimientos de terreno y las limitaciones posteriores a la pandemia, los cuales obstaculizan la expansión de su sector hidroeléctrico.

Dado el papel crítico del cambio climático como variable externa, es esencial evaluar la generación hidroeléctrica y las operaciones de los embalses utilizando parámetros clave como temperatura, precipitación, humedad, caudal del río y características de la cuenca. Estos indicadores proporcionan datos fundamentales para diseñar sistemas hidroeléctricos resilientes y eficientes. Además, se recomienda que los países africanos exploren la energía solar, ya que el continente posee el 60 % de los recursos solares más valiosos del mundo, ofreciendo una vía complementaria hacia el desarrollo energético sostenible.

Si bien la energía hidroeléctrica ofrece una vía fiable para el acceso a la energía y el avance socioeconómico de países como Etiopía, Tanzania, Zambia y Zimbabue, su desarrollo debe garantizar beneficios tangibles para las comunidades locales y los ecosistemas a fin de ser verdaderamente sostenible. Las investigaciones futuras deberían explorar la integración de otras fuentes renovables en todo el continente, con el apoyo de mecanismos financieros ecológicos que puedan acelerar la transición de África hacia un futuro energético limpio, diversificado y sostenible.

Rol de autores

- **Sebastián Naranjo-Silva:** conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición.

Referencias

[1] IRENA. (2020) Renewable energy statistics 2020. renewable hydropower (including mixed plants). International Renewable Energy Agency. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r1

[2] ——. (2021) Renewable power generation costs in 2020. International Renewable Energy Agency. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r2

[3] ——, *Renewable Energy Capacity Highlights 2019*. International Renewable Energy Agency, 2019. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r3

[4] IHA. (2022) Hydropower status report 2022. International Hydropower Association. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r4

[5] REN21. (2023) Renewables 2023 global status report energy supply collection. REN21 Renewables now. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r5

[6] S. Naranjo-Silva, D. Punina-Guerrero, L. Rivera-Gonzalez, K. Escobar-Segovia, J. D. Barros-Enríquez, J. A. Almeida-Domínguez, and J. Álvarez del Castillo, "Hydropower scenarios in the face of climate change in Ecuador," *Sustainability*, vol. 15, no. 13, p. 10160, Jun. 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/su151310160

[7] M. M. Uamusse, K. Tussupova, and K. M. Persson, "Climate change effects on hydropower in Mozambique," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 14, p. 4842, Jul. 2020. [Online]. Available: http://doi.org/10.3390/app10144842

[8] A. Mayer, L. Castro-Díaz, M. C. López, G. Leturcq, and E. F. Morán, "Is hydropower worth it? Exploring Amazonian resettlement, human development and environmental costs with the Belo Monte project in Brazil," *Energy Research & Social Science*, vol. 78, p. 102129, Aug. 2021. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102129

[9] IEA. (2022) World energy outlook special report Africa energy outlook. International Energy Agency. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r11

[10] E. Mutambara, "Examining organizational politics as the cause of the crisis in energy generation in developing countries: the instance of Zimbabwe," *International Journal of Research in Business and Social Science (2147- 4478)*, vol. 12, no. 4, pp. 01–14, Jun. 2023. [Online]. Available: http://doi.org/10.20525/ijrbs.v12i4.2432

[11] C. Wang, D. Wang, and J. Zhang, "Experimental study on isolated operation of hydro-turbine governing system of Lunzua hydropower station in Zambia," *Renewable Energy*, vol. 180, pp. 1237–1247, Dec. 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.014

[12] WBG. (2011) The world bank in Viet Nam. World Bank Group. All Rights Reserved. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r12

[13] IHA. (2021) Hydropower status report 2021. International Hydropower Association. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r13

[14] MapChart. (2021) World map: Advanced. the advanced world map adds political and geographical features to the basic world map. MapChart. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r14

[15] B. P., *Statistical Review of World Energy 2022. Globally Consistent Data on World Energy Markets*. British Petroleum P. L. C., 2022. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r15

[16] M. Roni, T. Mosier, B. Li, S. S. Alam, V. Durvasulu, B. Lawson, D. Steindorf, B. Pracheil, and V. Chalishazar, "Hydropower flexibility valuation tool for flow requirement evaluation," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 217–228, Dec. 2023. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.172

[17] IEA. (2022) Hydropower special market report. International Energy Agency. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r17

[18] G. A. Tiruye, A. T. Besha, Y. S. Mekonnen, N. E. Benti, G. A. Gebreslase, and R. A. Tufa, "Opportunities and challenges of renewable energy production in Ethiopia," *Sustainability*, vol. 13, no. 18, p. 10381, Sep. 2021. [Online]. Available: http://doi.org/10.3390/su131810381

[19] F. Abera, D. Asfaw, A. Engida, and A. Melesse, "Optimal operation of hydropower reservoirs under climate change: The case of Tekeze Reservoir, Eastern Nile," *Water*, vol. 10, no. 3, p. 273, Mar. 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/w10030273

[20] B. Khaniya, C. Karunanayake, M. B. Gunathilake, and U. Rathnayake, "Projection of future hydropower generation in Samanalawewa power plant, Sri Lanka," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, pp. 1–11, Oct. 2020. [Online]. Available: http://doi.org/10.1155/2020/8862067

[21] Y. Meng, J. Liu, Z. Wang, G. Mao, K. Wang, and H. Yang, "Undermined co-benefits of hydropower and irrigation under climate change," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 167, p. 105375, Apr. 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105375

[22] A. K. Belay, D. Atenafu, S. Birhan, and T. Tegengn, "Techno-economic feasibility study of the gunde teklehaymanote micro-hydropower plant at Tindwat River, Central Gondar, Ethiopia," *Iranica Journal of Energy & Environment*, vol. 11, no. 2, pp. 130–136, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.5829/ijee.2020.11.02.06

[23] T. W. Mekonnen, S. T. Teferi, F. S. Kebede, and G. Anandarajah, "Assessment of impacts of climate change on hydropower-dominated power system—the case of Ethiopia," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 4, p. 1954, Feb. 2022. [Online]. Available: http://doi.org/10.3390/app12041954

[24] B. van der Zwaan, A. Boccalon, and F. Dalla Longa, "Prospects for hydropower in Ethiopia: An energy-water nexus analysis," *Energy Strategy Reviews*, vol. 19, pp. 19–30, Jan. 2018. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.esr.2017.11.001

[25] K. B. Mirani, M. A. Ayele, T. K. Lohani, and T. Y. Ukumo, "Evaluation of hydropower generation and reservoir operation under climate change from Kesem Reservoir, Ethiopia," *Advances in Meteorology*, vol. 2022, pp. 1–14, Jun. 2022. [Online]. Available: http://doi.org/10.1155/2022/3336257

[26] X. Zhang, H.-Y. Li, Z. D. Deng, C. Ringler, Y. Gao, M. I. Hejazi, and L. R. Leung, "Impacts of climate change, policy and water-energy-food nexus on hydropower development," *Renewable Energy*, vol. 116, pp. 827–834, Feb. 2018. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.030

[27] T. F. Agajie, A. Fopah-Lele, I. Amoussou, B. Khan, M. Bajaj, I. Zaitsev, and E. Tanyi, "Enhancing ethiopian power distribution with novel hybrid renewable energy systems for sustainable reliability and cost efficiency," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, May 2024. [Online]. Available: http://doi.org/10.1038/s41598-024-61413-8

[28] M. T. Boke, S. A. Moges, and Z. A. Dejen, "Optimizing renewable-based energy supply options for power generation in Ethiopia," *PLOS ONE*, vol. 17, no. 1, p. e0262595, Jan. 2022. [Online]. Available: http://doi.org/10.1371/journal.pone.0262595

[29] A. D. Hailu, "Ethiopia hydropower development and Nile basin hydro politics," *AIMS Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 87–101, 2022. [Online]. Available: http://doi.org/10.3934/energy.2022006

[30] ITA. (2023) Energy resource guide. Tanzania - renewable energy. International Trade Administration. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r30

[31] O. J. Mdee, T. K. Nielsen, C. Z. Kimambo, and J. Kihedu, "Assessment of hydropower resources in Tanzania. A review article," *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, vol. 3, p. 4, 2018. [Online]. Available: http://doi.org/10.1051/rees/2018004

[32] B. Kichonge, "The status and future prospects of hydropower for sustainable water and energy development in Tanzania," *Journal of Renewable Energy*, vol. 2018, pp. 1–12, 2018. [Online]. Available: http://doi.org/10.1155/2018/6570358

[33] G. Ardizzon, G. Cavazzini, and G. Pavesi, "A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: Advances and future challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 746–761, Mar. 2014. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.043

[34] R. M. Kadigi, N. S. Mdoe, G. C. Ashimogo, and S. Morardet, "Water for irrigation or hydropower generation?—complex questions regarding water allocation in Tanzania," *Agricultural Water Management*, vol. 95, no. 8, pp. 984–992, Aug. 2008. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.03.008

[35] M. I. England, "Contested waterscapes: Irrigation and hydropower in the Great ruaha river basin, Tanzania," *Agricultural Water Management*, vol. 213, pp. 1084–1095, Mar. 2019. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.018

[36] R. J. Mwifunyi, D. C. Mnyanghwalo, and S. J. Kawambwa, "Enhancing service restoration in tanzanian power grid using internet of things sensors and renewable energy sources," *Tanzania Journal of Science*, vol. 49, no. 3, pp. 664–676, Sep. 2023. [Online]. Available: http://doi.org/10.4314/tjs.v49i3.10

[37] A. Abdalla and K. Ibwe, "Smart grid in Tanzania: Research opportunities," *Tanzania Journal of Engineering and Technology*, vol. 42, no. 2, pp. 170–183, Jun. 2023. [Online]. Available: http://doi.org/10.52339/tjet.v42i2.838

[38] USAID, *Power Africa: Zambia Energy Sector Overview.* African Power Platform, 2016. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r38

[39] UCS. (2014) How hydroelectric energy works. Union of Concerned Scientists. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r39

[40] F. Mudenda, M. van Dijk, and A. Bekker, "Development of evaluation framework for the selection of run-of-river hydropower potential sites to be included in the Zambian Hydropower Atlas," *Journal of Water and Climate Change*, vol. 13, no. 11, pp. 4000–4018, Oct. 2022. [Online]. Available: http://doi.org/10.2166/wcc.2022.262

[41] D. Chirwa, R. Goyal, and E. Mulenga, "Floating solar photovoltaic (FSPV) potential in Zambia: Case studies on six hydropower power plant reservoirs," *Renewable Energy Focus*, vol. 44, pp. 344–356, Mar. 2023. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.ref.2023.01.007

[42] ERB, *Energy Sector Report 2020 of Zambia.* Energy Regulatiom Board, 2020. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r44

[43] R. S. Winton, C. R. Teodoru, E. Calamita, F. Kleinschroth, K. Banda, I. Nyambe, and B. Wehrli, "Anthropogenic influences on Zambian water quality: hydropower and land-use change," *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 23, no. 7, pp. 981–994, 2021. [Online]. Available: http://doi.org/10.1039/D1EM00006C

[44] A. Levenda, I. Behrsin, and F. Disano, "Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice implications of renewable energy technologies," *Energy Research & Social Science*, vol. 71, p. 101837, Jan. 2021. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101837

[45] K. J. Nyoni, A. Kaonga, G. Muyunda, H. Phiri, and A. C. Mumba, "System studies to assess preparedness of the Zambian electrical grid for the energy transition through integration of large-scale variable renewable energy sources," *Journal of Electrical Electronics Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 168–186, 2022. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r45

[46] E. Mulenga, A. Kabanshi, H. Mupeta, M. Ndiaye, E. Nyirenda, and K. Mulenga, "Techno-economic analysis of off-grid PV-Diesel power generation system for rural electrification: A case study of Chilubi district in Zambia," *Renewable Energy*, vol. 203, pp. 601–611, Feb. 2023. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.112

[47] T. Linah Ruwa, T. Ruwa, and S. Abbasoglu, "Exploration and modelling of renewable energy sources and mini-grid installation opportunities in Zimbabwe," in *16th International Conference on Clean Energy (ICCE-2018)*, 2018. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r48

[48] M. Howells, B. Boehlert, and P. C. Benítez, "Potential climate change risks to meeting Zimbabwe's NDC goals and how to become resilient," *Energies*, vol. 14, no. 18, p. 5827, Sep. 2021. [Online]. Available: http://doi.org/10.3390/en14185827

[49] J. Akpan, H. Kumba, and O. Olanrewaju, "Sustainable energy in Zimbabwe - Status, challenges and solutions," *Renewable Energies*, vol. 2, no. 2, Jul. 2024. [Online]. Available: http://doi.org/10.1177/27533735241276201

[50] T. Murombo, *Climate Change and Energy in Zimbabwe: Towards a Low Carbon Energy Industry*, 10 2019, pp. 205–242. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r50

[51] A. Maronga, K. J. Nyoni, P. G. Tuohy, and A. Shane, "Evaluation of PV and CSP systems to supply power in the Zimbabwe mining sector," *Energies*, vol. 14, no. 13, p. 3740, Jun. 2021. [Online]. Available: http://doi.org/10.3390/en14133740

[52] M. Ekandjo, H. Makurira, E. Mwelwa, and W. Gumindoga, "Impacts of hydropower dam operations in the Mana Pools National Park floodplains," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 106, pp. 11–16, Aug. 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.05.009

[53] R. Spalding-Fecher, A. Chapman, F. Yamba, H. Walimwipi, H. Kling, B. Tembo, I. Nyambe, and B. Cuamba, "The vulnerability of hydropower production in the Zambezi river basin to the impacts of climate change and irrigation development," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 21, no. 5, pp. 721–742, Nov. 2014. [Online]. Available: http://doi.org/10.1007/s11027-014-9619-7

[54] A. Salazar, "Caracterización del potencial térmico RSU, para la generación de energía eléctrica, utilizando carbonización hidrotérmica," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 29, pp. 58–65, Jan. 2023. [Online]. Available: http://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.05

[55] S. Obahoundje and A. Diedhiou, "Potential impacts of climate, land use and land cover changes on hydropower generation in West Africa: a review," *Environmental Research Letters*, vol. 17, no. 4, p. 043005, Mar. 2022. [Online]. Available: http://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5b3b

[56] H. Kling, P. Stanzel, and M. Fuchs, "Regional assessment of the hydropower potential of rivers in west africa," *Energy Procedia*, vol. 97, pp. 286–293, Nov. 2016. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.002

[57] J. Hartmann, *Manual de Entrenamiento sobre Cambio Climático e Hidroenergía.* Proyecto AICCA, Ministerio del Ambiente y Agua de Ecuador – CONDESAN, 2020. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar7r57

[58] S. Naranjo-Silva and J. Álvarez del Castillo, "Hydropower: Projections in a changing climate and impacts by this "clean" source," *CienciAmérica*, vol. 10, no. 2, pp. 32–45, Jul. 2021. [Online]. Available: http://doi.org/10.33210/ca.v10i2.363

[59] B. Hamududu and A. Killingtveit, "Assessing climate change impacts on global hydropower," *Energies*, vol. 5, no. 2, pp. 305–322, Feb. 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en5020305

[60] S. A. Ali, S. Aadhar, H. L. Shah, and V. Mishra, "Projected increase in hydropower production in India under climate change," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, Aug. 2018. [Online]. Available: http://doi.org/10.1038/s41598-018-30489-4

[61] M. Jakob, R. Soria, C. Trinidad, O. Edenhofer, C. Bak, D. Bouille, D. Buira, H. Carlino, V. Gutman, C. Hübner, B. Knopf, A. Lucena, L. Santos, A. Scott, J. C. Steckel, K. Tanaka, A. Vogt-Schilb, and K. Yamada, "Green fiscal reform for a just energy transition in Latin America," *Economics*, vol. 13, no. 1, Mar. 2019. [Online]. Available: http://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2019-17

[62] S. Alnaqbi, S. Alasad, H. Aljaghoub, A. Alami, M. Abdelkareem, and A. Olabi, "Applicability of hydropower generation and pumped hydro energy storage in the middle East and North Africa," *Energies*, vol. 15, no. 7, p. 2412, Mar. 2022. [Online]. Available: http://doi.org/10.3390/en15072412

[63] S. Naranjo-Silva and J. Álvarez del Castillo, "The american continent hydropower development and the sustainability: A review," *International Journal of Engineering Science Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 66–79, Apr. 2022. [Online]. Available: http://doi.org/10.29121/ijoest.v6.i2.2022.315

[64] M. Tan-Mullins, F. Urban, and G. Mang, "Evaluating the behaviour of chinese stakeholders engaged in large hydropower projects in Asia and Africa," *The China Quarterly*, vol. 230, pp. 464–488, May 2017. [Online]. Available: http://doi.org/10.1017/S0305741016001041

[65] M. Antwi and D. D. Sedegah, *Climate Change and Societal Change—Impact on Hydropower Energy Generation.* Elsevier, 2018, pp. 63–73. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/b978-0-12-813016-2.00005-8

[66] D. K. Danso, B. François, B. Hingray, and A. Diedhiou, "Assessing hydropower flexibility for integrating solar and wind energy in West Africa using dynamic programming and sensitivity analysis. Illustration with the Akosombo Reservoir, Ghana," *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, p. 125559, Mar. 2021. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125559

[67] M. Amir and S. Z. Khan, "Assessment of renewable energy: Status, challenges,

COVID-19 impacts, opportunities, and sustainable energy solutions in Africa," *Energy and Built Environment*, vol. 3, no. 3, pp. 348–362, Jul. 2022. [Online]. Available: http://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.03.002

[68] K. Ukoba, T. J. Kunene, P. Harmse, V. T. Lukong, and T. Chien Jen, "The role of renewable energy sources and industry 4.0 focus for Africa: A review," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 2, p. 1074, Jan. 2023. [Online]. Available: http://doi.org/10.3390/app13021074