
Artículos

El modelo OSeMOSYS y la descarbonización a largo plazo del sector eléctrico en Galápagos



OSeMOSYS model and the long-term decarbonization of the power sector in Galapagos

 **Esteban Meneses**

Escuela Politécnica del Litoral, Ecuador
estebanmenesesg@gmail.com

 **Rafael Soria**

Universidad San Francisco de Quito, Ecuador
rsoriap@usfq.edu.ec

Revista Tecnológica ESPOL - RTE

vol. 35, núm. 2, Esp. p. 76 - 93, 2023

Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador

ISSN: 0257-1749

ISSN-E: 1390-3659

Periodicidad: Semestral

rte@espol.edu.ec

Recepción: 16 Julio 2023

Aprobación: 22 Agosto 2023

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/844/8444931013/>

Resumen: OSeMOSYS (*Open Source Modelling System*) es un modelo de equilibrio parcial que busca satisfacer la demanda energética en el horizonte de tiempo planteado, que se optimiza por mínimo costo. El modelo ofrece diversas ventajas debido a su fácil uso y su condición de código abierto, lo que le permite estar en constante actualización y evolución gracias a una comunidad creciente. Entre sus aplicaciones están los sistemas energéticos, los diferentes usos del suelo y la capacidad de plantear distintos escenarios de acuerdo con la información disponible. El trabajo presenta los principales componentes del modelo, sus diversas opciones de uso y casos de uso en algunas regiones del mundo, incluido el caso de expansión eléctrica al año 2050 en las Islas Galápagos. Como resultado, no solo es posible contar con electricidad 100% renovable en las Islas, también es un escenario menos costoso en relación a mantener el sector eléctrico como se encuentra en la actualidad. Dicha inversión sería menos de la mitad de lo que se gastaría si se sigue con las políticas eléctricas actuales. Para alcanzar la descarbonización de las Islas, se tiene que empezar a invertir en energías renovables que, con el mejoramiento de su tecnología, son cada vez menos costosas y más eficientes. Es importante recalcar que, para cualquier plan a largo plazo, se debe contar con los estudios ambientales necesarios, más aun tratándose de un lugar con tanta riqueza natural.

Palabras clave: código abierto, planificación energética, energía renovable, capacidad, potencia.

Abstract: OSeMOSYS (Open Source Modeling System) is a partial equilibrium model that aims to meet energy demand over a specified time horizon, optimizing for minimum cost. The model offers a variety of advantages due to its ease of use and open-source status, which allows it to be constantly updated and evolved by a growing community. Among its applications are energy systems as well as different possible land uses. In addition, the user can establish a variety of scenarios according to the available information. In this way, the work presents its main components as well as its various usage options, in addition to case studies in some regions of the

world, including the case of electrical expansion to 2050 in the Galapagos Islands. As a result, it is possible to have 100% renewable electricity in the islands, and it is a less costly scenario than maintaining the electricity sector as it is today. This investment would be less than half of what would be spent if current electricity policies were continued. To achieve decarbonization on the islands, it is necessary to start investing in renewable energies, which, with the improvement of their technology, are becoming increasingly less expensive and more efficient. It is important to note that any long-term plan must include the necessary environmental studies, especially in a place with so much natural wealth.

Keywords: open source, energy planning, renewable energy, capacity, power, greenhouse gases (GHG).

Introducción

El archipiélago de las Galápagos se encuentra alrededor de 1.000 km de las costas de Ecuador. Estas islas son jóvenes en términos geológicos, lo que las hace vulnerables a especies con mayor tiempo de evolución. Su historia de asentamientos humanos comenzó a mediados del milenio pasado, cuando eran visitadas por piratas y balleneros, y después fueron colonizadas por primera vez para realizar actividades agrícolas por exiliados y presos políticos de los primeros gobiernos de la naciente República del Ecuador, en los años 30 del siglo XIX. Las islas fueron declaradas Patrimonio Natural de la Humanidad y Reserva de la Biósfera por la UNESCO. en el año de 1978 y 1984 respectivamente, desde entonces las islas han crecido demográficamente, al igual que el turismo que llega cada año a las islas del Parque Nacional Galápagos, PNG (2023).

Actualmente, el 97% del área del archipiélago es parte del PNG y la Reserva Marina de Galápagos. El 3% o 230 km² del área de las cuatro islas pobladas está destinada para asentamientos humanos; de esta área, el 48% está en la isla Santa Cruz, sobre todo en las zonas altas designadas para la agricultura (84%) (WWF, 2003). Demográficamente, Santa Cruz es la más poblada, con alrededor de 18.000 habitantes, seguida de San Cristóbal (7.200), Isabela (2.400) y Floreana (160). Estas islas concentran sus poblaciones alrededor de los puertos, con pequeños asentamientos en zonas agrícolas altas (INEC, 2015). La economía de las Islas Galápagos pasó de ser agrícola a una basada en el turismo, siendo este rubro el 88% de sus ingresos en 2006 (Epler 2007). Sin embargo, De Miras (1995) estimó que solo el 7% de la riqueza se queda en las islas, ya que los principales operadores turísticos son extranjeros o del territorio continental ecuatoriano.

El número de visitantes a las Islas Galápagos aumentó significativamente desde finales de la década del ochenta. Así, el número de turistas que visitan las islas superó el límite oficial recomendado de 12.000 habitantes. Para hacer frente a la demanda creciente de turistas, el límite se amplió a 25.000, pero incluso este nuevo límite fue superado. Esto plantea preguntas sobre cuánto tiempo más podrán las islas soportar el crecimiento vertiginoso del turismo. En el año 2022, el archipiélago recibió 267 mil turistas (MAATE, 2023). Asimismo, la población local también experimentó un crecimiento exponencial, pasando de 1.346 habitantes en 1950 a 25.244 en 2015 (INEC, 2015). Este crecimiento de turistas y población local se reflejó en la economía, que creció aproximadamente un 78% entre 1999 y 2005, o un 9,6 % anual, lo que llevó a Galápagos a ser una de las regiones de mayor crecimiento a nivel mundial en términos económicos (Taylor, Hardner, and Stewart, 2009). El valor agregado bruto (VAB) en las islas en el año 2022 fue alrededor de USD 260 millones. y su VAB per cápita fue alrededor de USD 9 mil (BCE 2023a).

Este crecimiento turístico ha impulsado la inmigración, lo que provoca un riesgo para la seguridad alimentaria del lugar (Walsh and Mena, 2016). Según Sampedro et al. (2020), las islas importaron el 75% de los productos agrícolas que consumieron en el año 2017. Estos volúmenes las hacen vulnerables a las especies invasoras. Como resultado, dos de las especies de plantas invasoras, la guayaba y la mora, se han apoderado de áreas de tierra que antes se cultivaban, incluso en áreas restringidas del parque (Snell et al., 2002). Tanto el crecimiento demográfico como el turístico han generado preocupación en términos energéticos, por lo que resulta necesario considerar la expansión energética del archipiélago.

Actualmente, la electricidad en las islas Galápagos proviene en su mayoría de motores de combustión interna (84%), eólica (12%) y solar (4%). Las islas importan grandes volúmenes de derivados de hidrocarburos para satisfacer las necesidades energéticas de la población local y el turismo (IIGE, 2018). En consecuencia, la enorme riqueza biológica de las islas resulta vulnerable a posibles derrames de combustible. Es así como, en 2008, el gobierno ecuatoriano lanzó la *Iniciativa Cero Combustibles Fósiles en Galápagos*, con la finalidad de eliminar el uso de combustibles fósiles y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero al ambiente (PNUD, 2016).

Para la construcción de un modelo de expansión eléctrica a largo plazo, se tienen varias opciones de modelos y programas, en su mayoría modelos pagados, lo que dificulta su uso masivo, principalmente en economías en desarrollo. En consecuencia, el modelo de código abierto OSeMOSYS, representa una opción de fácil acceso y aprendizaje. Este modelo de equilibrio parcial, que optimiza al menor costo, considera: eficiencia tecnológica, infraestructura actual energética, capacidad de almacenamiento actual, la vida operacional de las tecnologías, factores de capacidad de las plantas, perfiles de recursos disponibles (viento, sol, etc), pérdidas por distribución y/o transmisión, variables exógenas al modelo como el PIB, crecimiento poblacional, entre otras. Dicho modelo fue presentado por primera vez en el taller IEA en 2008, escrito en GNU MathProg y después desarrollado en GAMS, y Python (Niet et al., 2021). Esta herramienta fue desarrollada para ayudar a los planificadores de energía, así como para la comunidad científica de energía (Howells et al., 2011).

El trabajo tiene como objetivo mostrar el funcionamiento del modelo OSeMOSYS y algunos casos de uso. Por tanto, el trabajo se estructura de la siguiente manera: La sección de metodología describe el modelo, sus principales características y plataformas de uso, y datos del caso en las islas; la sección de resultados indica los principales hallazgos de los casos a nivel global, y el caso de uso en las islas Galápagos; finalmente se presentan algunas conclusiones.

Metodología

Modelo OSeMOSYS

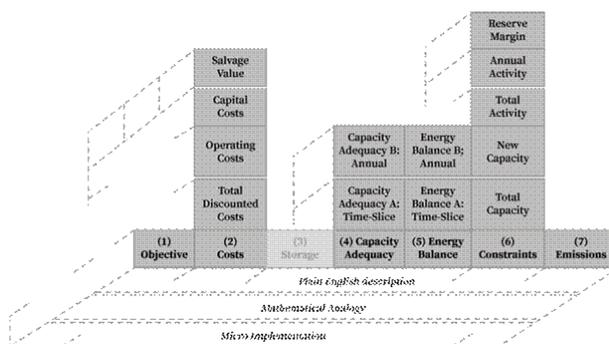
OSeMOSYS es un modelo de equilibrio, es decir, la oferta de energía es igual a la demanda. El modelo, al ser de código abierto, es un modelo que permite mejoras. Por tanto, es posible acceder a las ecuaciones del modelo y modificarlas a conveniencia, lo cual requiere un poco de destreza en la escritura de código.

Actualmente, existe también la nube de OSeMOSYS, donde el usuario puede crear una cuenta y correr el modelo, y asimismo se puede encontrar la última versión de la aplicación aquí. Tanto la aplicación como la nube de OSeMOSYS funcionan en conjunto; en la aplicación se ingresan los datos al modelo y en la nube se corre el modelo. El usuario tiene a disposición el programa *clisAND* (Cannone et al. 2022), permite correr el modelo con un archivo Excel para mayor facilidad. Para más información, se pueden tomar los cursos en línea disponibles gratuitamente en Open University (University 2023).

El modelo está desarrollado en bloques y cada uno en tres niveles de abstracción. Los parámetros, las variables, las restricciones y las relaciones con sus objetivos están descritas en inglés, así como, la formulación algebraica y su implementación en un lenguaje de programación. Fue desarrollado en bloques para facilitar su independencia y mejoras. Existen siete bloques:

(1) objetivo, (2) costos, (3) almacenamiento, (4) capacidad adecuada, (5) balance energético, (6) restricciones, (7) y emisiones (Howells et al., 2011). Ver Figura 1.

Figura 1
Bloques y niveles de abstracción del modelo OSeMOSYS



Para la definición del modelo existe: Conjuntos (ej. rango temporal, intervalos de tiempo, etc.), parámetros globales, parámetros de demandas, parámetros de tecnología, parámetros de desempeño, parámetros de costos, parámetros de capacidad, restricciones de capacidad, restricciones de inversión, restricciones de actividad, márgenes de reserva, emisiones y penalidades. Para mayor detalle sobre los parámetros, variables, conjuntos y ecuaciones, remítase al manual OSeMOSYS (2023).

Función Objetivo

La función objetivo que se encuentra en el primer bloque (ver Figura 1) calcula el mínimo valor presente neto del sistema energético para satisfacer la demanda dada, que puede ser solo del sector eléctrico o uno que incluya todos los sistemas energéticos y usos de suelo. Para alcanzar la función objetivo deben satisfacer las diferentes restricciones (Howells et al., 2011).

Costos

Se tienen los costos de cada tecnología, tanto los de capital de inversión, así como los de operación y mantenimiento, fijos y variables. Además, se puede ingresar los provenientes de penalidades por emisiones de GEI. Los costos variables se calculan para cada intervalo de tiempo especificado por el usuario, modo de operación de la tecnología, año de operación y región modelada. Los costos fijos se calculan de acuerdo con la capacidad instalada de cada tecnología. Al final se obtiene el costo de operación y mantenimiento anual que es la suma de los costos fijos y variables, estos son llevados al primer año modelado con una tasa de descuento. Los costos anuales de inversión están determinados por el nivel de capacidad existente y nueva, e igualmente son llevados al primer año modelado con una tasa de descuento global o por tecnología (Howells et al., 2011).

Capacidad Adecuada

Debe existir una capacidad suficiente para cada tecnología que permita cubrir la demanda energética anual. Es necesario determinar la capacidad total disponible previa al periodo del modelo, es decir, la capacidad actual al comienzo del periodo. Para determinar la capacidad suficiente anual, se calcula la tasa de actividad de cada tecnología, intervalo de tiempo y región modelada que es ingresada por el usuario en los factores de capacidad (Howells et al., 2011).

Balance Energético

Los niveles de operación toman en cuenta la actividad, el uso de energía, la producción de energía y las emisiones en cada modo de operación y tecnología que son calculados por intervalos de tiempo. Por tanto, es importante que la producción energética cubra la demanda en cada intervalo. La tasa de producción de combustibles por tecnología es determinada multiplicando la tasa de actividad de la relación de entrada/salida del combustible, que es la eficiencia de la tecnología (Howells et al., 2011).

Restricciones

Podemos limitar el modelo de varias formas, mediante capacidad con límites superiores y/o inferiores, por generación con límites superiores y/o inferiores, por cantidad de emisiones por el periodo total del modelo y mediante penalidades por emisiones por tecnología y/o por región. Finalmente, se lo puede limitar por máxima o mínima inversión en términos monetarios por unidad de capacidad. Dichos límites se los puede hacer por tecnología, por región y por año (Howells et al., 2011).

Emisiones

Para las emisiones de GEI el usuario ingresa las relaciones de emisiones por unidad de actividad. Se puede considerar más de un GEI por cada tecnología y modo de operación; solo la actividad promedio de cada tecnología y su modo de operación se multiplican por la relación emisión/actividad. Las emisiones anuales se obtienen de la suma de las emisiones anuales por modo de operación. Sin embargo, no todas las tecnologías son consideradas en las emisiones, por ejemplo, las tecnologías renovables como la solar y la eólica. (Howells et al., 2011).

OSeMOSYS Galápagos

Área de Estudio

El archipiélago de Galápagos está formado por 22 islas, entre grandes y medianas, y 107 islotes de origen volcánico con una inmensa riqueza biológica (WWF, 2003). Estas islas enfrentan un permanente y vertiginoso crecimiento turístico que aumenta la demanda energética. En consecuencia, es necesario incrementar la oferta energética; en este sentido, el trabajo tiene cuatro regiones que son las cuatro islas pobladas del archipiélago; Santa Cruz, San Cristóbal, Isabela y Floreana (ver Figura 2).

Figura 2
Infraestructura eléctrica por la Empresa Eléctrica de Galápagos



Datos

El trabajo usa diversas fuentes, la información sobre demandas eléctricas e infraestructura tecnológica existente proviene del SISDAT (ARCONER, 2023), que contiene datos históricos; las proyecciones de demanda del trabajo de la Fundación Bariloche (Fundación Bariloche FB, 2020). Los precios de los combustibles se consideran subsidios. Las proyecciones al año 2050 proceden del promedio histórico de subsidios del Banco Central del Ecuador del sector petrolero (BCE, 2023b).

Desarrollo del Modelo de Galápagos

Se definieron dos estaciones, la lluviosa y cálida que va desde diciembre hasta mayo, y la seca que va desde junio a noviembre. A continuación, se definieron las cuatro regiones; San Cristóbal (SC), Santa Cruz (STC), Isabela (IS), Floreana (FL). El horizonte de tiempo del modelo es de 2019 al 2050, y los primeros años se usan para calibrar al modelo. Los perfiles de los recursos provienen de las siguientes fuentes: El recurso viento obtiene datos de Ninja Wind, que se originan en el satélite de la NASA., MERRA (Staffell and Pfenninger, 2016). Los datos de irradiancia global se adquieren del System Advisor Model (SAM, 2023), de la National Renewable Energy Laboratory. Para estos perfiles se toma el año meteorológico que comprende promedios quince años o más. Las curvas de carga de cada isla forman parte de las demandas eléctricas. Finalmente, se tienen dos modos de operación debido a las baterías, uno que almacenan y en otro distribuyen energía.

Infraestructura Energética de Galápagos

La electricidad en las islas proviene de fuentes no renovables (84%), como las centrales térmicas de motores de combustión interna alimentadas con diésel (ver Tabla 1). Por tanto, para cambiar esta realidad se necesitan fuertes inversiones en energías limpias que con su desarrollo experimenten costos decrecientes progresivamente más accesibles para economías en desarrollo. Actualmente, el archipiélago cuenta con energía solar y eólica. Existen estudios del potencial energético de energía geotérmica en la isla Isabela y de olas en el sur de las islas (Portilla, Sosa, and Cavaleri 2013). Sin embargo, son tecnologías más costosas, especialmente la de las olas que aún se encuentra en desarrollo.

Tabla 1
Infraestructura eléctrica actual

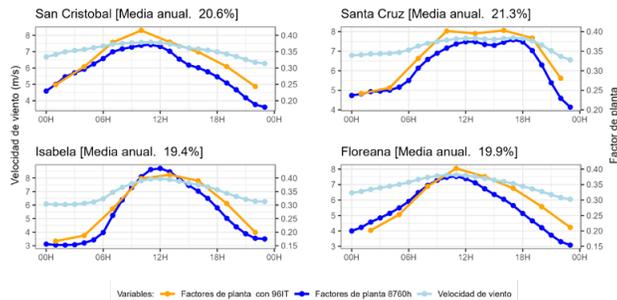
| Central | Subtipo central | Isla | Puesta en operación | Vida operacional | Potencia nominal (kW) |
|-------------------------------|-----------------|-------------------|---------------------|------------------|-----------------------|
| Santa Cruz Solar Puerto Ayora | Solar | Santa Cruz/Baltra | Diciembre de 2014 | 30 años | 1.521 |
| Baltra Solar | Solar | Santa Cruz/Baltra | Enero de 2017 | 30 años | 67 |
| Santa Cruz Solar aislados | Solar | Santa Cruz/Baltra | Diciembre de 2010 | 30 años | 10 |
| Baltra Eólico | Eólica | Santa Cruz/Baltra | 2014 | 25 años | 2.250 |
| Santa Cruz térmica | Térmica (MCI) | Santa Cruz/Baltra | 1990 | 15 años | 14.810 |
| San Cristóbal Solar Eolica | Solar | San Cristóbal | Julio de 2011 | 30 años | 13 |
| San Cristóbal Eólico | Eólica | San Cristóbal | 2007 | 25 años | 2.400 |
| San Cristóbal térmica | Térmica (MCI) | San Cristóbal | 1991 | 15 años | 7.100 |
| Isabela Solar aislados | Solar | Isabela | Enero de 2011 | 30 años | 8 |
| Isabela Solar | Solar | Isabela | Noviembre de 2018 | 30 años | 953 |
| Isabela Térmica | Térmica (MCI) | Isabela | 2018 | 15 años | 1.625 |
| Floreana Perla Solar | Solar | Floreana | Septiembre de 2004 | 30 años | 21 |
| Floreana Solar aislados | Solar | Floreana | Septiembre de 2004 | 30 años | 6 |
| Floreana Térmica | Térmica (MCI) | Floreana | 2010 | 15 años | 440 |

Perfiles de los Recursos

Actualmente, el modelo OSeMOSYS no soporta perfiles horarios de los recursos; en consecuencia, fue necesario cambiar de perfiles de 8.760 horas al año a 96 intervalos de tiempo al año, que es lo que soporta el modelo. Para esta transformación se agruparon mediante promedios, ocho grupos de tres horas cada uno, por cada día del año, partiendo desde las cero horas; de esta forma se agregó los perfiles de los recursos al modelo. La Figura 3 ilustra dicha transformación en un día de temporada seca, donde se puede observar la diferencia entre los factores de planta⁷ del recurso eólico con una resolución de 8.760 horas y los factores de planta con 96 intervalos de tiempo. Aunque se pierde algo de resolución, en general sigue la misma trayectoria del perfil

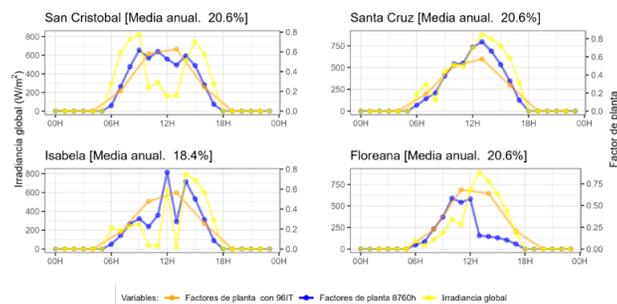
del recurso (velocidad del viento). Cabe mencionar que al tratarse de un día de temporada seca, donde el recurso está en sus registros más altos, los factores de planta registran sus máximos valores; por lo tanto, en meses como enero dichos factores de planta serán más bajos; también se puede observar el promedio anual de la capacidad de las plantas en cada isla.

Figura 3
Perfil del viento en un día de la temporada seca - 15 de agosto



Para los perfiles solares se realizó el mismo procedimiento. Como resultado, se pueden observar factores de planta que llegan en promedio al 80% de la capacidad nominal en horas del mediodía, con promedios anuales de alrededor de 20% en las cuatro islas. Aunque al igual que en los perfiles eólicos sigue la trayectoria del recurso, se pierde la resolución de los picos (irradiancia global). Ver Figura 4.

Figura 4
Perfil solar en un día de la temporada seca - 15 de agosto



Costos Empleados en las Tecnologías

Los costos de las dos tecnologías renovables empleadas en el modelo siguen decreciendo en el tiempo debido a que son tecnologías maduras. Los costos de las centrales termoeléctricas, así como su eficiencia, mejoran. Sin embargo, las termoeléctricas son alimentadas por combustibles fósiles, específicamente por diésel, lo que las hace vulnerables al mercado de materias primas y a las reservas con las que cuenta cada país, mismas que están decreciendo en todo el mundo. Por tanto, se espera que los combustibles sigan al alza (Ver Tabla 2). Además, se debe considerar que el planeta está en transición a energías renovables para alcanzar la carbono-neutralidad en términos de emisiones de GEI que permitan mitigar el cambio climático.

Tabla 2
Opciones de costos de electricidad

| Opciones de planes de electricidad | Costos de inversión (USD/kW) | | Costos fijos de O&M (USD/kW/yr) | | Costos Variables de O&M (USD/kW/yr) | |
|---------------------------------------|---------------------------------|-------|------------------------------------|------|--|------|
| | 2019 | 2050 | 2019 | 2050 | 2019 | 2050 |
| Wind | 2.114 | 1.158 | 35 | 17 | 0 | 0 |
| Solar PV | 1.740 | 960 | 17 | 10 | 0 | 0 |
| Thermal (ICE) | 1.200 | 1.200 | 20 | 20 | 1 | 1 |

Resultados y Discusión

OSeMOSYS es un modelo de código abierto que permite su uso en diferentes regiones del mundo, así como también mejoras en el mismo, que cuenta con casos de estudio en más de cincuenta países alrededor del mundo. (Detailed Model Documentation, 2023). Se mostrarán algunos casos de uso, incluido el caso de uso en las islas Galápagos con mayor detalle, esto con fines ilustrativos del alcance del modelo.

Casos de uso del Modelo OSeMOSYS en el Mundo

El trabajo de (De Moura, Legey, and Howells 2018) muestra las ventajas y desventajas en los procesos de interconexión energética con los países vecinos de Brasil (Argentina, Bolivia, Guayana, Paraguay y Perú). Sus escenarios fueron modelados con OSeMOSYS y comparados con los resultados del modelo OSeMOSYS SAMBA que incluye los países de Sudamérica. Como resultado, se obtuvo que Sudamérica tiene una alta dependencia de la generación hídrica. La comparación de escenarios SAMBA indica una reducción de hasta 23 GW en la expansión de la capacidad instalada brasileña y una adición de 5 GW en la capacidad instalada de los demás países de Sudamérica. Además, se mostró que países como Guyana y Bolivia, que tienen gran potencial hídrico pero poco financiamiento, pueden mejorar su infraestructura eléctrica con acuerdos energéticos con Brasil.

El trabajo de Quevedo and Moya (2022) presenta cuatro escenarios de expansión eléctrica con OSeMOSYS que han servido de insumo para los tomadores de decisiones. Se detallan las características de vulnerabilidad geográfica y su alta dependencia a las importaciones de combustibles fósiles. En consecuencia, establecieron como meta lo acordado por República Dominicana en el Acuerdo de París, en donde, estimaron que para alcanzar dicho acuerdo sobre la reducción de un 25% de GEI para el año 2030, en comparación con las emisiones del año 2010, se necesita un total de inversión de USD 11.404 millones a una tasa de descuento de 4%.

Finalmente, el trabajo de Tchanda et al. (2023) modela la expansión eléctrica de Togo al año 2050. Se proponen tres escenarios; uno referencial que mantiene los niveles actuales de inversión en energía renovable, otro que propone cero emisiones de GEI al 2050 y el último que añade penalidades a las emisiones de GEI. Como resultado, el modelo propone energía solar e importaciones de combustibles como solución óptima a largo plazo, esto por encima del gas y de las hidroeléctricas, lo que implica una inversión diez veces mayor a la actual.

Caso de Uso en Galápagos

Escenarios de Expansión Eléctrica de Galápagos

Para el caso de las islas Galápagos se propusieron dos escenarios; el Referencial (REF) que sigue una trayectoria como la actual, con pequeñas inversiones en energías renovables y que al final del periodo tiene una alta proporción de energía no renovable proveniente de las centrales térmicas; y el escenario de descarbonización profunda llamado en este trabajo, Futuro Solar y Eólico (S&E). Ver Tabla 3.

Tabla 3
Escenarios a largo plazo de la expansión eléctrica en Galápagos

| Escenarios | Descripción |
|-----------------------------|---|
| Referencial (REF) | Energía térmica predominante (MCI) sin grandes inversiones en energías renovables (ER), con pequeñas adiciones en ER, alcanzando alrededor de 50 % de energía limpia al 2050 en el sector eléctrico en el archipiélago. |
| Futuro solar y eólico (S&E) | Fuerte inversión solar y eólica, alcanzando hasta un 75 % de energía limpia en 2030 y el 100 % hasta 2040 en el sector eléctrico. |

El escenario Referencial (REF) busca seguir el mismo ritmo de inversión en energías renovables, es decir, sin mayor inversión en energías limpias; de esta forma se mantiene un mínimo de generación termoeléctrica. Como consecuencia, la matriz eléctrica no cambia significativamente, y las centrales térmicas (MCI) permanecen como la tecnología predominante en las islas (ver Figura 5). En la misma figura se puede observar el almacenamiento de energía eléctrica en naranja y la capacidad necesaria de almacenamiento hasta el año 2050. A pesar de que las centrales térmicas siguen dominando hasta el final del periodo modelado, este escenario alcanza alrededor de un 50% de electricidad limpia de fuentes renovables. También, se observa en el cuadrante de capacidad, que una vez cumplida la vida útil de las centrales térmicas, el modelo las reemplaza con centrales solares; lo mismo sucede con la tecnología eólica, que es reemplazada igualmente por la solar debido a que la tecnología eólica es más costosa. Al final del periodo, la mayor parte es energía térmica y solar. Con respecto a la capacidad de las baterías, es necesario alcanzar hasta 6 MW hasta el final del periodo, lo que permite cubrir la curva de demanda eléctrica.

En la Figura 6 se puede observar con mayor detalle la generación y capacidad eléctrica por isla; en Santa Cruz y San Cristóbal en el escenario REF se observa el mismo patrón que en el agregado de las cuatro islas, con un aumento tanto en la generación como en la capacidad solar.

Además, se observa un reemplazo de las centrales eólicas por las solares y una disminución de la capacidad de las centrales térmicas (MCI).

Por otro lado, en la Figura 7 se observa que Isabela alcanza a cubrir la demanda eléctrica con alrededor del 70% de energía solar y con mayor capacidad de baterías, de este modo disminuye la capacidad térmica en la isla. En lo que concierne a Floreana se observa que al final del periodo se tiene sobre el 50% de energía solar, así como una disminución importante de capacidad térmica en la isla.

Figura 5
Generación, capacidad y almacenamiento en el escenario referencial (REF)

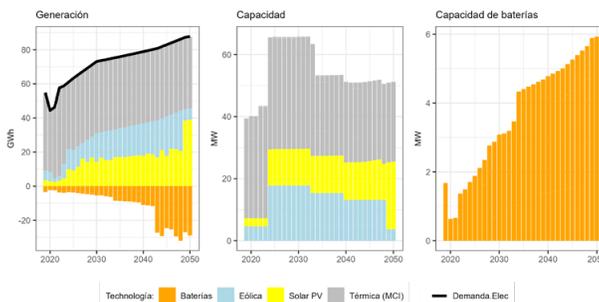
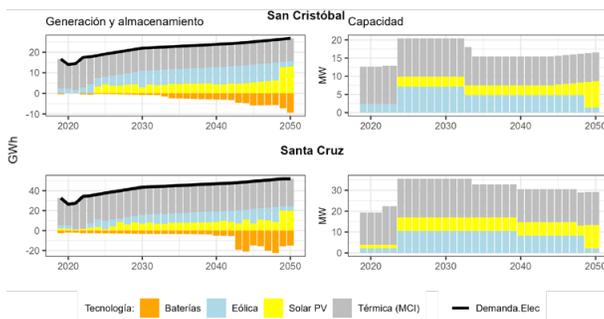


Figura 6
Generación, capacidad y almacenamiento de Santa Cruz y San Cristóbal en el escenario referencial (REF)



En el escenario de descarbonización profunda llamado Solar y Eólico (S&E), donde se asumen políticas agresivas de inversión en energía renovable, se alcanza alrededor de un 75% de energía limpia para el año 2030 y el 100% en el año 2040. Se observa que al final del periodo todas las centrales eólicas son reemplazadas por solares debido a su menor costo; por otro lado, la capacidad térmica se reduce casi en su totalidad y la capacidad de almacenamiento para cubrir la demanda eléctrica sobrepasa los 10 MW (ver Figura 8). En consecuencia, las emisiones de GEI por generación eléctrica son eliminadas a partir del año 2040.

Figura 7
Generación, capacidad y almacenamiento de Isabela y Floreana en el escenario referencial (REF)

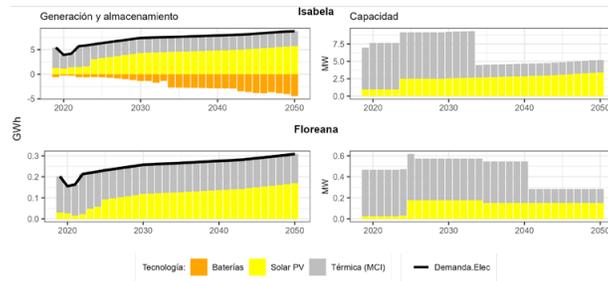
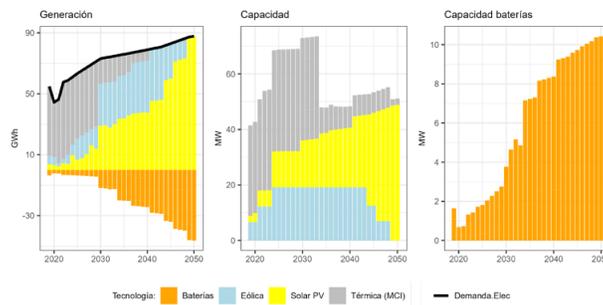


Figura 8
Generación, capacidad y almacenamiento en el escenario referencial Solar y Eólico



En la Figura 9 del escenario S&E se puede observar en detalle por isla; en San Cristóbal se alcanza el 100% de electricidad renovable en el año 2038, mientras que en Santa Cruz llega en el año 2040; esto debido a que es la isla más poblada del archipiélago. Con respecto a la expansión de capacidad, se tiene, al igual que en el escenario anterior, que ambas islas reemplazan tanto las centrales térmicas como las eólicas por solares.

Las islas con menor población Isabela y Floreana alcanzan más rápido el 100% de electricidad limpia, Isabela en el año 2034 y Floreana en el año 2026. Por otro lado, ambas islas llegan al final del periodo modelado con 100% de capacidad solar (ver Figura 10).

Figura 9
Generación, capacidad y almacenamiento de San Cristóbal y Santa Cruz en el escenario Solar y Eólico (S&E)

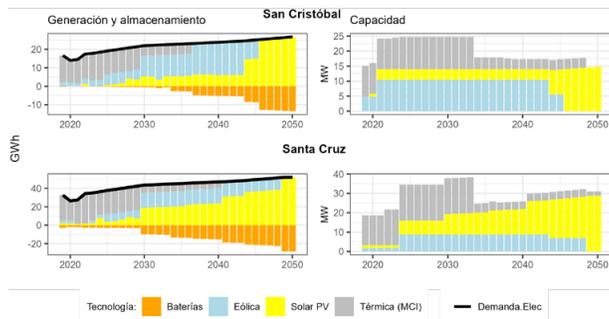
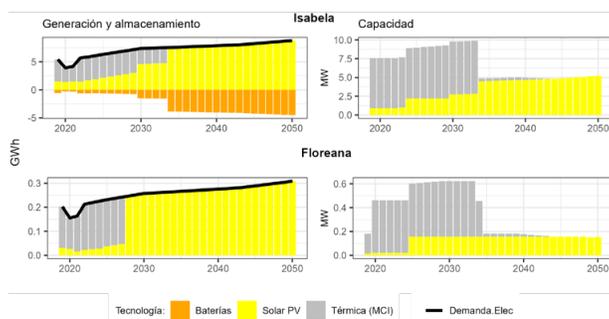


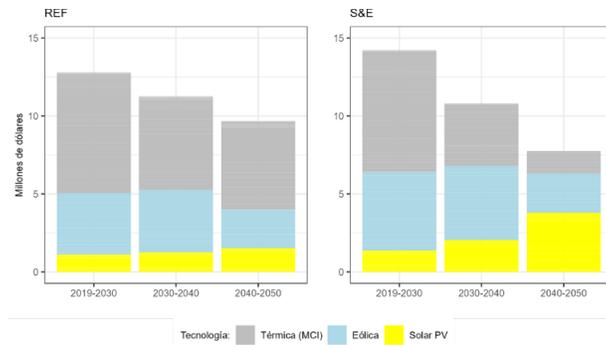
Figura 10
 Generación, capacidad y almacenamiento de Isabela y Floreana en el escenario Solar y Eólico (S&E)



Costos de Inversión y de Operación y Mantenimiento

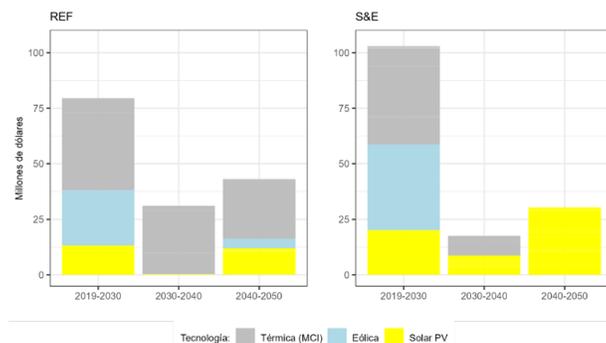
Para los costos de inversión, de operación y mantenimiento, tanto los fijos como los variables, se usa el valor presente neto en dólares del año 202110. La Figura 11 muestra los costos de inversión, la primera década del periodo modelado el escenario Referencial (REF) es alrededor de USD 25 millones menor. Sin embargo, en las siguientes dos décadas del periodo, el escenario S&E tiene menos costos de inversión. En total, se tiene que el escenario REF sin mayor inversión es apenas USD 5 millones menos costoso que el escenario de descarbonización profunda del sector eléctrico en términos de inversión.

Figura 11
 Inversión por periodos y escenarios



En lo referente a los costos fijos de operación y mantenimiento, se tiene que el escenario REF en la primera década del modelo es menor que el escenario más ambicioso. En la segunda década es ligeramente menos costoso, y en la última es más costoso (ver Figura 12). Cabe recordar que los costos fijos usados tanto en la tecnología solar como en la eólica son más altos (ver Tabla 2).

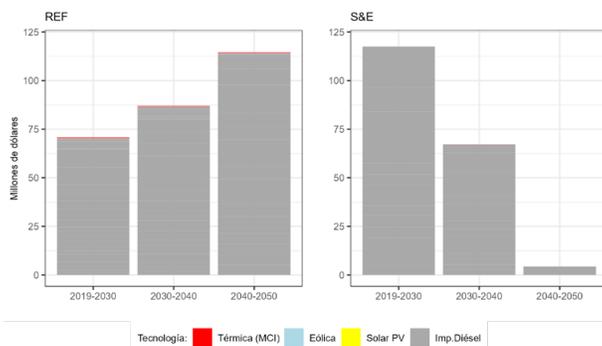
Figura 12
Costos fijos de operación y mantenimiento por periodos y escenarios



Las tecnologías renovables no presentan costos variables de operación y mantenimiento al usar recursos de libre disponibilidad, mientras que las centrales termoeléctricas tienen costos de 1,04 USD/MWh, a los que se les agregan los costos de importación de diésel que son altos. Como resultado, los costos variables del escenario REF tienden al alza a pesar de mantener subsidios. En la primera década del modelo los costos de ambos escenarios parten relativamente iguales, sin embargo, en los siguientes periodos son mucho menores. Al final del periodo, se tiene que en términos de costos variables el escenario REF es más del doble que el escenario S&E, con una diferencia aproximada de USD 170 millones. La diferencia marginal en los costos de inversión y fijos entre el escenario REF y S&E no se compara con la diferencia en costos variables. Por tanto, apostar por la descarbonización del sector eléctrico es una inversión menos costosa que mantener las políticas energéticas actuales (ver Figura 13).

Figura 13

Costos de operación y mantenimiento variables por periodos y escenarios.



Conclusiones

El modelo OSeMOSYS de código abierto es flexible y versátil; fácil de usar; y tiene una curva corta de aprendizaje, lo que le permite desarrollarse rápidamente; con casos de uso en varias regiones del mundo y una importante comunidad internacional que hace posible su evolución. Una de las debilidades del modelo es que no soporta perfiles horarios de los recursos renovables. Esto puede ser debido a la cantidad de parámetros y variables que toma en cuenta. En consecuencia, el modelo requiere hacer una abreviación de los datos y se pierde algo de resolución. Por el contrario, el modelo trata con mayor detalle los costos, lo que permite ingresar costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, fijos y variables, tasa de descuento de estos, costos de inversión de almacenamiento, costos de recuperación, entre otros.

Sobre los costos necesarios para la descarbonización del sector eléctrico, el modelo mostró que en términos de inversión el escenario referencial es apenas USD 5 millones menos costoso que el escenario de descarbonización profunda (S&E). En términos de costos fijos de operación y mantenimiento, se observa que el escenario REF es ligeramente menos costoso que el escenario S&E (USD millones).

Finalmente, los costos de O&M variables en el escenario S&E son considerablemente menores que los del escenario REF con un ahorro de USD 170 millones hasta el final del periodo en el 2050. En conclusión, no solo es posible la descarbonización del sector eléctrico, sino que también es una mejor inversión que continuar con las políticas actuales en el sector. Además de considerar lo anterior, se podría agregar lo que genera el turismo de conservación que valora la biodiversidad de las islas y su proyección de desarrollo con energías renovables, sumados los beneficios incalculables que se obtendrían al eliminar la posibilidad de derrames de combustibles en las costas del archipiélago. Por otro lado, es necesario recalcar que al tratarse de un archipiélago megadiverso estas inversiones en energías alternativas se tienen que hacer con todas las precauciones debidas.

Por tanto, es sumamente importante que antes de comenzar cualquier proyecto de energías renovables se hagan los estudios necesarios a detalle de todos los posibles impactos ambientales que prioricen el uso de zonas ocupadas con asentamientos humanos. Una de las formas podría ser la energía no distribuida solar mediante paneles y baterías para el uso en viviendas y locales comerciales, lo que resulta clave en hábitats limitados como los de las islas Galápagos. Considero que de esta manera se puede incidir en la soberanía energética de las islas.

Es importante recalcar que la transición de energías no renovables a renovables no se enfoque enteramente en la reducción de emisiones de GEI, ya que por ejemplo las emisiones de GEI que producen las Galápagos son extremadamente marginales en la contribución global y debido a los permanentes vientos alisios, estas emisiones no se quedan en las islas. Por lo tanto, corresponde a toda la comunidad atacar los problemas de raíz y a la comunidad científica crear el conocimiento necesario para avanzar de forma acelerada hacia un futuro sostenible.

Para un próximo trabajo, se pueden desarrollar múltiples escenarios, como un escenario de expansión eléctrica con energía de olas, uno con energía geotérmica y/o uno con energía solar distribuida. Además, se pueden incluir todos los escenarios con y sin subsidios a los combustibles, los cuales representan una gran problemática en el país. Asimismo, se pueden proponer escenarios de expansión eléctrica que incluyan transporte terrestre eléctrico y/o marítimo, en donde la información disponible y la calidad de esta son las únicas limitantes del alcance del modelo.

Referencias

- ARCONER. 2023. SISDAT. <http://sisdat.controlrecursosyenergia.gob.ec/Login.aspx?ReturnUrl=%2fHome%2fFrame.aspx>.
- Astudillo, Fernando J. 2017. *Environmental Historical Archaeology of the Galápagos Islands: Paleoethnobotany of Hacienda El Progreso, 1870-1904*.
- Banco Central del Ecuador (BCE). 2023a. Cuenta Cantonales Sector Real. 2023. <https://contenido.bce.fin.ec/>
- Banco Central del Ecuador (BCE). Información Estadística. 2023. https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/indice_cifras.html
- Cannone, Carla, Lucy Allington, Lucy Allington, Philip Goynes, Cesar Valderrama, Vedran Kapor, et al. 2022. "clicSAND for OSeMOSYS: A User-Friendly Interface Using Open-Source Optimisation Software for Energy System Modelling Analysis." 2022. <https://assets.researchsquare.com/files/rs-1338761/v2/ffe64f16-9c9a-41e6-a298-5b0691391707.pdf?c=1663613864>.
- De Miras, Claude. 1995. *Las Islas Galápagos: Un Reto Económico: Tres Contradicciones básicas*. 513. Fundación Charles Darwin para las Islas Galápagos.
- De Moura, Gustavo Nikolaus Pinto, Luiz Fernando Loureiro Legey, and Mark Howells. 2018. "A Brazilian Perspective of Power Systems Integration Using OSeMOSYS SAMBA – South America Model Base – and the Bargaining Power of Neighbouring Countries: A Cooperative Games Approach." *Energy Policy* 115 (April): 470–85. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.045>.
- Epler, Bruce. 2007. Tourism, the Economy, Population Growth, and Conservation in Galapagos.
- Fundación Bariloche FB, BID. 2020. *Escenarios de demanda y oferta energética y opciones de política energética*
- Gardumi, Francesco, Abhishek Shivakumar, Robbie Morrison, Constantinos Taliotis, Oliver Broad, Agnese Beltramo, Vignesh Sridharan, et al. 2018. "From the Development of an Open-Source Energy Modelling Tool to Its Application and the Creation of Communities of Practice: The Example of OSeMOSYS." *Energy Strategy Reviews* 20 (April): 209–28. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.03.005>.
- Howells, Mark, Holger Rogner, Neil Strachan, Charles Heaps, Hillard Huntington, Socrates Kypreos, Alison Hughes, et al. 2011. "OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System." *Energy Policy* 39 (10): 5850–70. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.033>.
- IEA. 2008. International Energy Agency, International Energy Workshop. 2008. https://www.internationalenergyworkshop.org/old/Workshop_2008.html.
- IIGE. 2018. Balance energético de la Provincia de Galápagos 2018.
- INEC. 2015. Censo de Población y Vivienda-Galápagos. 2015. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda-galapagos/>.
- Ministerio del ambiente, agua y transición ecológica (MAATE). 2023. INFORME ANUAL Ingreso de Visitantes a Las Áreas Protegidas de Galápagos. https://galapagos.gob.ec/wp-content/uploads/2023/02/INFORME_ANUAL_VISITANTES_2022_DUP.pdf
- Niet, T., A. Shivakumar, F. Gardumi, W. Usher, E. Williams, and M. Howells. 2021. Developing a Community of Practice Around an Open Source Energy Modelling Tool. *Energy Strategy Reviews* 35 (May): 100650. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100650>.
- OSeMOSYS. 2023. Structure of OSeMOSYS. 2023. <https://osemosys.readthedocs.io/en/latest/manual/Structure%20of%20OSeMOSYS.html>
- Pfenninger, Stefan, and Iain Staffell. 2016. "Long-Term Patterns of European PV Output Using 30 Years of Validated Hourly Reanalysis and Satellite Data." *Energy* 114 (November): 1251–65. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.060>.

- PNG. 2023. Parque Nacional Galápagos | Sistema Nacional de Áreas Protegidas Del Ecuador. 2023. <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/es/areas-protegidas/parque-nacional-gal%C3%A1pagos>
- PNUD. 2016. “Energía Verde para Galápagos Inagotable, Limpia y Segura.” *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*, 22. https://www.undp.org/content/dam/ecuador/docs/documentos/proyectos/ambiente/pnud_ec
REVISTA ENERGIA VERDE PARA GALAPAGOS
- Portilla, Jesus, Jeison Sosa, and Luigi Cavaleri. 2013. “Wave Energy Resources: Wave Climate and Exploitation.”
- Quevedo, Jarrizon, and Idalberto Herrera Moya. 2022. “Modeling of the Dominican Republic Energy Systems with OSeMOSYS to Assess Alternative Scenarios for the Expansion of Renewable Energy Sources.” *Energy Nexus* 6 (June): 100075. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100075>.
- Sampedro, Carolina, Francesco Pizzitutti, Diego Quiroga, Stephen J. Walsh, and Carlos F. Mena. 2020. “Food Supply System Dynamics in the Galapagos Islands: Agriculture, Livestock and Imports.” *Renewable Agriculture and Food Systems* 35 (3): 234–48. <https://doi.org/10.1017/S1742170518000534>.
- Snell, HL, A Tye, CE Causton, and R Bensted-Smith. 2002. Current Status of and Threats to the Terrestrial Biodiversity of Galapagos. *A Biodiversity Vision for the Galapagos Islands*, 30–47.
- Staffell, Iain, and Stefan Pfenninger. 2016. “Using Bias-Corrected Reanalysis to Simulate Current and Future Wind Power Output.” *Energy* 114 (November): 1224–39. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068>.
- Taylor, J. Edward, Jared Hardner, and Micki Stewart. 2009. Ecotourism and Economic Growth in the Galapagos: An Island Economy-Wide Analysis. *Environment and Development Economics* 14 (2): 139–62. <https://doi.org/10.1017/S1355770X08004646>.
- Tchanda, Eso-Wazam, Adekunlé Salami, Kodjo Koffi Mawugno, Amy Nabiliou, and Seydou Ouedraogo. 2023. Modelling the Optimal Electricity Mix for Togo by 2050 Using OSeMOSYS. *International Journal of Renewable Energy Development* 12 (February): 430–39. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.50104>.
- University, Open. 2023. Distance Learning Courses and Adult Education - the Open University 2023. <https://www.open.ac.uk/>.
- Walsh, Stephen J., and Carlos F. Mena. 2016. “Interactions of Social, Terrestrial, and Marine Sub-Systems in the Galapagos Islands, Ecuador.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113 (51): 14536–43. <https://doi.org/10.1073/pnas.1604990113>.
- WWF. 2003. “Migración y Ambiente En Las Islas Galápagos ISBN 978-9978-58-129-2 - Libro. 2003. <https://isbn.cloud/9789978581292/migracion-y-ambiente-en-las-islas-galapagos/>.



Disponible en:

[/articulo.oa?id=84449318444931013](#)

[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 América Latina y el Caribe,
España y Portugal
Modelo de publicación sin fines de lucro para conservar la
naturaleza académica y abierta de la comunicación científica

Esteban Meneses, Rafael Soria

El modelo OSeMOSYS y la descarbonización a largo plazo del sector eléctrico en Galápagos

OSeMOSYS model and the long-term decarbonization of the power sector in Galapagos

Revista Tecnológica ESPOL - RTE

vol. 35, núm. 2, Esp. p. 76 - 93, 2023

Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador

rte@espol.edu.ec

ISSN: 0257-1749 / **ISSN-E:** 1390-3659



CC BY-NC 4.0 LEGAL CODE

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.