



Viviendas con Electricidad Neutral con un Caso de Estudio en el Área Metropolitana de Bogotá-Colombia

Neutral Electricity Houses with a Case Study in the Metropolitan Area of Bogotá-Colombia.

Diego F. Quintero-Pulido^{1*}, Nolly Nataly Castañeda-Ibáñez², Roberto R. Balda-Ayala³

^{1*}Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de la Salle, Colombia. dquintero54@unisalle.edu.co; Orcid: 0000-0002-7292-6465

²Dr Ten BV, Países Bajos. diego@drten.nl

³Grupo de investigación en psicología básica y aplicada para el desarrollo social, Programa de Psicología Facultad de ciencias humanas y sociales, Corporación universitaria minuto de Dios UNIMINUTO Sede Principal, Colombia. nolly.castaneda@uniminuto.edu, nollynataly@gmail.com; Orcid: 0000-0001-6659-6124

How to cite: D.F. Quintero-Pulido, N.N. Castañeda-Ibáñez, R.R. Balda-Ayala, “Viviendas con Electricidad Neutral con un Caso de Estudio en el Área Metropolitana de Bogotá-Colombia”. *Respuestas*, vol. 26, no. 1, pp. 75-88, 2021.

Received on July 8, 2020 - Approved on November 11, 2020.

RESUMEN

Palabras clave:

Viviendas con electricidad neutral, Energía Solar Fotovoltaica; Baterías de sal marina, celdas de combustible de glicerol.

Este artículo revisa el desarrollo actual para incrementar el acceso a la electricidad y la implementación de viviendas con electricidad neutral (viviendas autónomas no conectadas a la red eléctrica) en diferentes escenarios. Además, se presentan con más detalle las posibles direcciones de investigación para tecnologías de viviendas con electricidad neutral. Para esto, se describe un caso de una posible vivienda con electricidad neutral en Colombia junto con algunos resultados iniciales de simulaciones usando energía solar fotovoltaica, una nueva batería a base de sal marina (*the Sea-Salt battery*) y una celda de combustible a base de glicerol (*the Glycerol Fuel Cell*) como sistema de respaldo. Las simulaciones utilizan el software BEopt y DstorageS. Este análisis se realiza utilizando datos medidos de consumo de electricidad en una vivienda localizada en la zona metropolitana de Bogotá-Colombia. Resultados preliminares muestran que una vivienda en Colombia puede funcionar con electricidad neutral, al tener una energía solar FV de 4 kW con una batería de sal marina de 10 kWh y una celda de combustible de glicerol de 2 kW funcionando de forma autónoma durante todo el año 2019.

ABSTRACT

Keywords:

Neutral Electricity Homes; Solar photovoltaic; The Sea Salt battery; Glycerol Fuel Cell.

This article reviews recent development to increase access to electricity and the implementation of neutral electricity homes (autonomous homes not connected to the electricity grid) in different scenarios. In this way, the focus of this research is on the different efforts to create homes with neutral electricity, considering their challenges at the macro and micro levels. In addition, it is shown possible research directions for technologies for neutral electricity homes. For this, a case of a possible house with neutral electricity in Colombia is described along with some initial results of simulations using photovoltaic solar energy, a new battery based on sea salt (*the Sea-Salt battery*) and a fuel cell based on glycerol (*the Glycerol Fuel Cell*) as a backup system. The simulations use the BEopt and DstorageS software. This analysis is performed using measured data on electricity consumption in a home located in the Bogotá-Colombia metropolitan area. Preliminary results show that a house in Colombia may be disconnected from the grid, having a 4 kW solar PV energy with a 10 kWh sea salt battery and a 2 kW glycerol fuel cell operating autonomously throughout the year 2019.

*Corresponding author.

E-mail Address: dquintero54@unisalle.edu.co (Diego F. Quintero-Pulido)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0

Introducción

Las viviendas con electricidad neutral son viviendas que tienen la opción de no estar conectadas a la red eléctrica y que pueden operar parcialmente de forma autónoma. Este tipo de viviendas pueden convertirse en un elemento importante en la futura infraestructura eléctrica. Por una parte, como el acceso mundial a la electricidad dentro de las viviendas es un elemento importante que puede, en muchos casos, mejorar las condiciones de una población, las viviendas con electricidad neutral pueden permitir dicho acceso en regiones que no cuentan con una infraestructura de red adecuada [1], [2].

Por otra parte, debido a las posibles consecuencias de un cambio climático mundial, la gran mayoría de los países está haciendo planes para una introducción masiva de energía renovable, especialmente de energía solar fotovoltaica (FV) y turbinas eólicas. Esta introducción masiva de energía renovable conduce, por un lado, a la generación local de energía, pero por otro lado, también a muchos desafíos que deben superarse. En este contexto, las viviendas con electricidad neutral pueden ser un elemento que puede apoyar la integración, ya que tienden a mantener la energía generada localmente. Estos dos temas conducen a dos tendencias opuestas de desarrollar e implementar viviendas con electricidad neutral; el enfoque de arriba hacia abajo y el enfoque de abajo hacia arriba.

El enfoque de arriba hacia abajo se refiere a los países que actualmente ya tienen una conexión estable a la red eléctrica y desean introducir más energía renovable en el sistema existente. Esto se aplica a los países desarrollados, pero también a las principales ciudades de la mayoría de los países en desarrollo (una conexión estable se refiere a una conexión a la red con escasez de energía menor a 300 minutos / año [3], [4]). Por ejemplo, en los Países Bajos y en Alemania, las viviendas con electricidad neutral son compatibles con los esquemas actuales de medición neta. Si el propietario de una vivienda compra una gran instalación de energía solar FV, la medición neta implica que al final del año, la factura total de electricidad se determinará en función de la diferencia entre el volumen total de producción de electricidad y el volumen total de consumo de electricidad [5], [6].

Sin embargo, el sistema de medición neta de energía solar FV ahora está cambiando debido a sus costos para el gobierno, pero también debido al efecto negativo en la estabilización del sistema eléctrico. Se espera que para 2023, se introduzca una tarifa de retroalimentación a los usuarios que será mucho más baja que la tarifa de electricidad consumida [7]. Otro ejemplo es en Colombia, donde el sistema tarifario de electricidad no ha incluido aun una tarifa de retroalimentación, lo cual genera menos incentivos para la explotación masiva de energía solar FV. Sin embargo, el mercado de energía solar FV en Colombia ha crecido más del 50% desde el 2015 [8]; esto implica que las viviendas están usando energía solar FV sin retroalimentación en la red. Dichas viviendas se encuentran limitadas al consumo de electricidad que se realiza al mismo tiempo de generación. Si existe un exceso de generación este es disipado en el sistema.

Sin embargo, también hay regiones donde la red eléctrica no existe o existe pero no es estable ni confiable [1], [9]. Por ejemplo, en los países del África subsahariana, se implementan soluciones actuales para conectar más ciudades y áreas rurales a la red principal [10]. No obstante, en esta parte de África, se necesita una gran inversión y mucha infraestructura para realizar esta conexión. Teniendo en cuenta las tendencias económicas locales actuales en estas áreas [11], parece que no hay suficientes posibilidades para aumentar el acceso a la electricidad de esta manera. Por otra parte, las políticas ambientales y los datos de los proveedores de servicios públicos muestran que también existe una tendencia en estas regiones hacia la introducción de una cantidad considerable de energía renovable, como la energía solar FV y las turbinas eólicas, entre otras. En particular, la energía solar FV es una tecnología flexible y fácil de usar que proporciona electricidad en el acto sin la necesidad de una infraestructura eléctrica compleja. Aquí, se puede utilizar un enfoque de abajo hacia arriba para la implementación de una vivienda 100% con electricidad neutral, lo que significa que las viviendas con electricidad neutral se pueden implementar utilizando energía solar FV y baterías de plomo ácido. Por lo tanto, estas viviendas con electricidad neutral también pueden verse como formas innovadoras

de implementación rápida de energías renovables. Ejemplos de tales desarrollos son los sistemas que combinan sistemas de energía solar FV, baterías y televisión en Tanzania y Kenia; en estas viviendas se utilizan aplicaciones de tarifas móviles para fijar precios, lo que permite a los usuarios pagar su electricidad [12]. Otro ejemplo es en Bangladesh, donde mediante el uso de un método de electrificación de enjambre, ha sido posible implementar energía solar FV y baterías en pueblos de bajos ingresos [13]. La idea básica es establecer una economía local en un pequeño pueblo. Inicialmente, se proporciona electricidad a una de las empresas utilizando solo una pequeña inversión por ejemplo, para que un panel solar y una luz LED funcionen cuando es de noche o hay alta nubosidad. Este negocio puede comenzar a compartir la electricidad producida por los paneles con sus vecinos, por lo que recibiría algún tipo de remuneración. Agregar estos clientes puede ayudar a la primera empresa a comprar más energía solar FV y, al final, podría expandir la red lentamente, hasta llegar a un pueblo con luces en todas las viviendas. Actualmente, este enfoque aún se encuentra en la etapa de desarrollo, y las tarifas arancelarias son objeto de discusión [14].

Ambos casos, el enfoque de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba, muestran que existe una tendencia hacia la implementación de soluciones donde las viviendas o grupos de viviendas producen una gran parte de su electricidad para su propio uso, con una tendencia a crear 100 % de soluciones con electricidad neutral, al menos durante una gran parte del tiempo. Además, en todos estos casos, el almacenamiento de electricidad se considera un activo importante. El objetivo de este documento es revisar algunos avances en el acceso a la electricidad en el mundo y la implementación de viviendas con electricidad neutral en diferentes escenarios. Se presenta una descripción general de los diferentes esfuerzos para crear viviendas con electricidad neutral considerando tanto el enfoque de arriba hacia abajo como el de abajo hacia arriba. Además, se presenta un caso de estudio de una vivienda con electricidad neutral en el área metropolitana de Bogotá-Colombia. Este artículo está organizado de la siguiente forma: En la segunda parte, se presenta una breve descripción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y cómo están conectados con el acceso a la electricidad. En la tercera parte, se explica los diferentes tipos de soluciones con electricidad neutral. En la cuarta parte, se presenta la posible configuración para una vivienda con electricidad neutral; en la quinta parte, los resultados de un estudio de caso de una vivienda con electricidad neutral utilizando datos de una vivienda real en Colombia. Finalmente, se extraen algunas conclusiones en la sexta parte.

Objetivos de sostenibilidad de las Naciones Unidas para 2030 con enfoque en el objetivo 7

El acceso mundial a la electricidad es necesario para reducir la pobreza, ya que sin electricidad, el desarrollo de los países tiende a ser lento y complicado. Actualmente, hay un progreso económico considerable en términos de infraestructura energética. Sin embargo, este crecimiento no es lo suficientemente rápido y, por lo tanto, se han definido los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (ONU) [15]. Los ODS tienen 17 temas principales que forman parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible adoptada en septiembre de 2015. En la agenda 2030, los países acordaron crear un conjunto de objetivos para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todos como parte de un nuevo desarrollo sostenible. Cada uno de los objetivos tiene objetivos específicos que se alcanzarán en los próximos años. Para lograr estos objetivos, todos los interesados relevantes deben participar: los gobiernos, el sector privado, la sociedad civil y las personas. Los ODS son distintivos porque incluyen las contribuciones de todos los países, independientemente de su situación social (ingresos altos, medios o bajos). Los objetivos muestran que terminar con la pobreza es un proceso que se combina con métodos y estrategias para abordar las necesidades sociales que promueven el crecimiento económico y al mismo tiempo protegen el medio ambiente y el cambio climático.

En el caso de la energía, el Banco Mundial estima que mil millones de personas (aproximadamente el 13% de la población mundial a partir de 2017) viven sin acceso a la electricidad, y alrededor del 40% de las personas en el mundo cocinan con combustibles fósiles en condiciones contaminantes [16]. Esta situación disminuye su salud y calidad de vida y, por lo tanto, la ONU ha creado el acceso universal a la electrificación y el uso de tecnologías limpias en los objetivos de energía de los ODS, con la intención de lograr esto para 2030 [15].

Uno de los 17 ODS es la Energía (ODS 7), que no sólo cubre los problemas relacionados con el acceso limitado a la electricidad, sino que también involucra un marco más global. El ODS 7 tiene tres puntos de acción principales:

1. Acceso a servicios energéticos universales y modernos.
2. Duplicar la mejora en eficiencia energética.
3. Duplicar la participación de las energías renovables en la producción mundial de energía.

Estos tres puntos de acción fueron mencionados por primera vez en 2011 por la iniciativa de energía sostenible para todos SEforAll (por sus siglas en inglés) [17] y fueron adaptados/incluidos en los objetivos del ODS 7. En detalle, el ODS 7 apunta a los siguientes objetivos para 2030:

- Garantizar el acceso universal a servicios de energía asequibles, confiables y modernos.
- Aumentar sustancialmente la participación de las energías renovables en la combinación energética global.
- duplicar la tasa global de mejora en la eficiencia energética.
- Mejorar la cooperación internacional para facilitar el acceso al desarrollo de energía limpia y tecnología, incluidas las energías renovables, la eficiencia energética y la tecnología avanzada y más limpia de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnología de energía limpia.
- Ampliar la infraestructura y actualizar la tecnología para suministrar servicios de energía modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular en los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, de conformidad con sus respectivos programas de apoyo.

Estos cinco objetivos indican las áreas en las que se deben desarrollar políticas como: aumentar la participación de las energías renovables en el panorama energético global y también mejorar la tasa de implementación de tecnologías de eficiencia energética. Sin embargo, el ODS 7 Energía está interconectado con los otros 16 ODS, y está vinculado a 125 de los 169 objetivos específicos de los ODS, que representan casi el 74% del total de objetivos. Hoy en día, se reconoce a nivel mundial que la planificación del acceso universal a la electricidad moderna es un objetivo principal en el plan nacional para el desarrollo de los países y los ODS [18].

Los estudios del Banco Mundial sobre apagones o cortes de electricidad, indican que la pérdida de electricidad conduce a una pérdida de valor económico en las comunidades [19]. Por ejemplo, en Tanzania durante 2012, los apagones le costaron a las empresas alrededor del 15% de sus ventas anuales. Además, cuando la electricidad es estable y está disponible, esto genera más ingresos, trabajo y educación para las personas en las comunidades [20]. Por otra parte, cuando la electricidad moderna no está disponible, esto crea restricciones para el crecimiento económico, pero cuando es estable y está disponible, aumenta el crecimiento y las oportunidades de empleo.

Electricidad neutral

Una forma alternativa de extender los sistemas eléctricos y aumentar el acceso a la electricidad es mediante el uso de electrificación neutral. La electricidad neutral significa que se configuran redes más pequeñas que no están conectadas a la red principal. En principio, existen tres enfoques para la electrificación neutral: sistemas de mini-red, micro-red y nano-red.

1. Una mini-red opera generalmente con menos de 10 MW de capacidad instalada, y cubre un área de alrededor de 50 km². Estos sistemas se usan generalmente en comunidades y, a veces, tienen una conexión restringida a la red

nacional que no es muy confiable. Sin embargo, en muchos casos, operan en lugares aislados, donde hay que atender una gran demanda durante el día durante todo el año.

2. Una micro-red se distingue de una mini-red principalmente por su tamaño. Funciona con menos de 100 kW de capacidad y funciona a un nivel de bajo voltaje que cubre áreas de alrededor de 3 km² a 8 km².

3. Las nano-redes (por ejemplo, una vivienda con electricidad neutral) se usan generalmente en comunidades remotas. Se pueden implementar rápidamente y se usan cuando una mini-red o una micro-red aún está en el proceso para ser implementadas. Los sistemas de nano-red se utilizan principalmente para viviendas individuales, pero posiblemente se extiendan a aproximadamente 1000 personas. Una nueva alternativa para las viviendas con electricidad neutral emerge, cuando estas viviendas todavía están débilmente conectadas a la red principal. En este caso, las viviendas (edificios o industrias) pueden usarse en la red como activos flexibles, y pueden desconectarse temporalmente. Por ejemplo, una vivienda puede desconectarse en momentos en que el consumo de electricidad en la red es demasiado alto; este enfoque puede usarse para reducir los picos en la red principal.

Las mini-redes y micro-redes generalmente funcionan con combustibles fósiles. Los generadores diesel son la opción típica, sin embargo, algunas tecnologías nuevas ya se han probado e implementado, como las celdas de combustible y las fuentes de energía renovables (por ejemplo, energía solar FV, turbinas eólicas, etc.) combinadas con baterías. En el caso ideal, una mini/micro-red ecológica consiste en fuentes basadas en energía renovable, almacenamiento y un sistema de respaldo. Cuando las mini/micro redes están diseñadas y configuradas adecuadamente, pueden ser más eficientes y rentables que una red centralizada. Esta es la razón por la cual la energía de generadores diesel y las mini-redes pequeñas de energía hidroeléctrica se han implementado en el pasado. Un ejemplo de este tipo es en Indonesia, donde unas 6000 personas en las islas usan generadores diesel y pequeñas centrales hidroeléctricas para cubrir sus necesidades de electricidad [21]. Hoy en día, los sistemas solares fotovoltaicos están comenzando a tomar el control del mercado de generadores diesel para reducir el consumo de combustible diesel, que generalmente es costoso en estas áreas [22]. Otro caso es en Maldivas, donde una gran parte de la población usa generadores diesel en una estructura de mini-red para cubrir las necesidades de los hoteles y algunas viviendas alrededor del hotel [23]. Actualmente, hay una transición en Las Maldivas hacia soluciones de energía 100% renovable, y se han dado los primeros pasos al hacer plantas híbridas de energía solar FV y diesel [24].

En particular, cuando las comunidades están lejos de las ciudades, se puede utilizar una solución de nano-red. En este caso, un sistema de nano-red puede implementarse más rápido y con menos complejidad que una mini o micro-red, que también tiene una conexión a la red principal. En los países en desarrollo, se utilizan pequeños sistemas solares fotovoltaicos (llamados sistemas solares “nano”), que producen unos pocos vatios de energía solar FV de hasta 1 kW y proporcionan esta electricidad para iluminar y cargar teléfonos móviles [25]. Además, estos sistemas se utilizan para alimentar pequeñas bombas de agua y otros sistemas con bajo consumo de energía. Estas soluciones de nano-red generalmente se combinan con baterías, y proporcionan una solución simple de suministro de electricidad en situaciones donde la red no está presente o no es estable.

Además, el costo de la energía solar FV ha disminuido rápidamente en los últimos años, debido al aumento del volumen del mercado, y se espera que continúe disminuyendo. El informe sobre las tendencias del mercado solar neutral [26] muestra que los productos solares fotovoltaicos crecerán de \$700 millones en 2018 a alrededor de \$2.4 mil millones en 2024. Este informe también estima que aproximadamente una de cada tres viviendas con electricidad neutral utilizará energía solar FV en la red para 2021. Aunque el mercado de soluciones de electricidad neutral está aumentando considerablemente, todavía no hay suficientes incentivos y estrategias para acelerar la implementación de sistemas de electricidad neutral a fin de alcanzar los objetivos de 2030 ODS para el acceso a la electricidad.

La siguiente sección, se enfoca en viviendas independientes o nano-red, ya que este estudio y la literatura mencionada

en las secciones anteriores puedan mostrar que las viviendas de nano-red pueden ser un activo importante para los sistemas eléctricos del futuro. Sin embargo, crear una vivienda 100% independiente sigue siendo una tarea que, hasta el alcance de esta investigación, no se ha logrado por completo. La vivienda con electricidad neutral es económicamente interesante si tiene un suministro de electricidad durante todo el año sin escasez, con una tecnología asequible que posiblemente pueda competir con la red eléctrica convencional.

Ejemplo de un sistema nano-red

Las nano-redes o las redes eléctricas autónomas, se están convirtiendo en un activo importante que puede aumentar el acceso a la electricidad en las zonas rurales. Tal sistema con electricidad neutral utiliza varios tipos de fuentes de electricidad renovables. Comúnmente se encuentran en combinación con baterías y un sistema de energía de respaldo para evitar cortes de energía. La Figura 1 ilustra una configuración común para una vivienda con electricidad neutral, teniendo en cuenta la necesidad de electricidad para calefacción, electrodomésticos, producción de agua y tratamiento de aguas residuales. Esta nano-red o vivienda con electricidad neutral tiene los siguientes componentes principales:

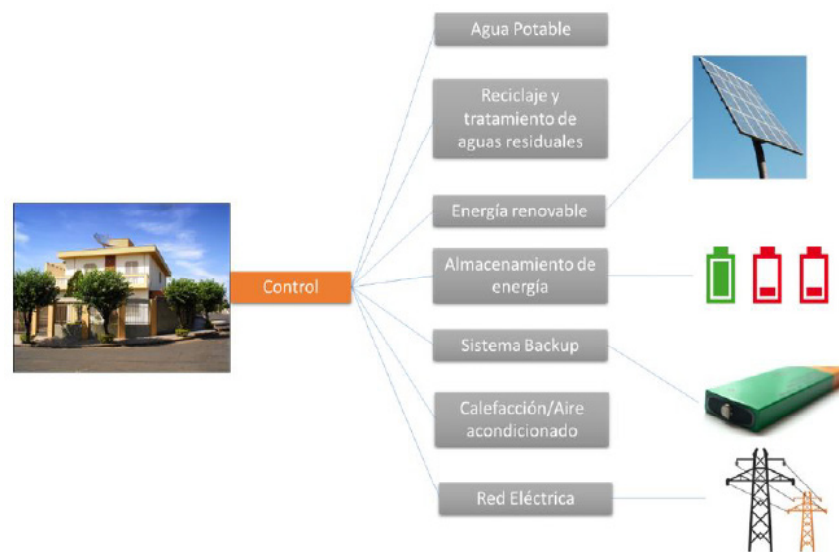


Figura 1. Configuración de una vivienda neutral

1. Generación de electricidad: energía solar FV o turbinas eólicas.
2. Almacenamiento de energía: generalmente baterías de plomo ácido, iones de litio o NiMH para viviendas con electricidad neutral.
3. Unidades de respaldo: un generador o una celda de combustible, un micro CHP (combine heat and power por sus siglas en inglés) basado en fuentes renovables (por ejemplo, biogás o pellets de madera) o pequeñas plantas de biodiesel.
4. Una conexión a una línea de red eléctrica, si está presente, que sólo se incluye para absorber el excedente de electricidad.
5. Dispositivos en una vivienda que consumen la mayor parte de la electricidad; en este caso, electrodomésticos estándar, una unidad de limpieza de agua, una planta de tratamiento de aguas residuales, manejo de residuos sólidos, y unidades de calefacción y refrigeración.

La combinación de estas diferentes tecnologías de generación puede llegar a proporcionar toda la electricidad necesaria para que una vivienda funcione diariamente durante todo el año. Sin embargo, en la práctica, todavía no está disponible una solución tecnológica rentable y eficiente que pueda integrarse en diferentes escenarios. Solo hay unos pocos casos de viviendas con electricidad neutral en el mundo, por lo que estos enfoques están relacionados con pequeñas viviendas con electricidad neutral o viviendas compactas, como en el sur de Gales [27] e Italia [28]. Estos enfoques muestran que las tecnologías actuales son, en principio, capaces de proporcionar la electricidad requerida para una vivienda con electricidad neutral; sin embargo, un suministro de electricidad rentable durante todo el año para toda la energía necesaria en una vivienda sigue siendo un gran desafío.

Estudio de caso de una vivienda con electricidad neutral en Colombia

En esta sección, se presenta un estudio de caso para una vivienda con electricidad neutral. El objetivo de este estudio fue demostrar que es técnicamente viable desarrollar una vivienda con electricidad neutral. Los aspectos económicos de las viviendas con electricidad neutral están más allá del alcance de este documento. La Figura 2 muestra la configuración de una vivienda con electricidad neutral usando nuevas tecnologías de almacenamiento de energía sostenible en Colombia. La mayoría de estas tecnologías son producidas en los Países Bajos (la batería de sal marina y la celda de combustible de glicerol). El desarrollo de este caso se hace para observar si el consumo de energía en una vivienda de Colombia puede ser suministrado por energías renovables y sistemas de almacenamiento.

En general, la configuración utiliza varias tecnologías para generar la electricidad necesaria para una vivienda. Para lograr esto, la energía solar FV se utiliza junto con una batería.

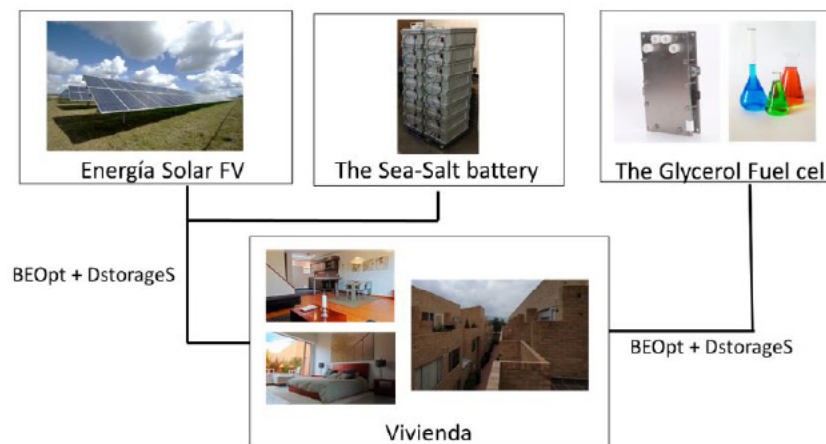


Figura 2. Prototipo de una vivienda con electricidad neutral en Colombia

Durante el día, la energía solar FV proporciona electricidad y durante la noche o durante la irradiación solar baja, la batería se utiliza como principal proveedor de electricidad. Además, se utiliza una celda de combustible como unidad de potencia de respaldo. La celda de combustible sólo se usa cuando la energía solar FV y la batería no son capaces de satisfacer la demanda de electricidad. A continuación, se proporciona una descripción más detallada de las tecnologías para esta configuración de vivienda con electricidad neutral:

- Energía solar FV: se pueden usar varios tipos de paneles solares fotovoltaicos comerciales para viviendas con electricidad neutral. Los datos de la producción de energía solar FV se pueden encontrar en diferentes fuentes; ver Pecan Street en los EE. UU. [29], en datos de la compañía eléctrica Codensa en Colombia [30], o en datos recopilados de mediciones de registradores de producción/ consumo de electricidad [31].

- **Batería de sal marina (The Sea-Salt battery):** esta batería es un nuevo sistema de almacenamiento de energía basado en grafito de carbono y con un electrolito hecho de sal marina y aditivos. La batería se está probando actualmente en los Países Bajos, Estados Unidos, Bélgica e Israel, y se espera que esté en el mercado en 2022 [32], [33]. Esta batería ha sido utilizada previamente en la investigación para su uso en redes inteligentes [34], [35]. En términos de costo, la batería está hecha de materiales abundantemente disponibles, y el costo esperado para 2025 es de 100 a 300 euros / kWh. El productor afirma que la batería es capaz de 10000 ciclos de electricidad con bajos signos de degradación.
- **Celda de combustible de Glycerol (*The Glycerol Fuel Cell*):** la celda de combustible de glicerol es un sistema electroquímico que es capaz de transformar el glicerol directamente en electricidad utilizando un catalizador de bajo costo. El glicerol es un subproducto (producto de desecho) de la producción de biodiesel. Esta tecnología ha sido investigada previamente por uno de los autores de este artículo [36]. Actualmente, el sistema está en desarrollo y se espera que esté en el mercado para 2025.
- **BEopt y DstorageS:** BEopt es un paquete de simulación de electricidad en viviendas desarrollado en EUA por el departamento de infraestructura [37] y DstorageS es una herramienta para la gestión descentralizada de la energía derivado de DEMKit una herramienta desarrollada en la Universidad de Twente, en los Países Bajos [38].

DEMKit y DstorageS utilizan simulaciones dinámicas discretas de series de tiempo, utilizando un enfoque de modelado ascendente. Una biblioteca con dispositivo, cuadrícula y componentes de control está disponible en la herramienta. Los componentes de dispositivos genéricos están disponibles para modelar el comportamiento de un dispositivo y sus restricciones de operación, como la capacidad de la batería. Los algoritmos de control adjuntos se pueden utilizar para optimizar el funcionamiento de los dispositivos teniendo en cuenta las restricciones dadas [39].

Los dispositivos dados se pueden conectar a un modelo de red física, de modo que sea posible evaluar los efectos de las acciones de control sobre la potencia suministrada y la calidad de la potencia (la batería de sal marina y la celda de combustible de glicerol son sistemas creados por la compañía Dr Ten BV [40] como parte de su investigación en curso sobre tecnologías de almacenamiento de energía sostenible).

Con BEopt y DstorageS se evaluó el rendimiento de una vivienda con electricidad neutral equipada con energía solar FV, una batería de sal marina y una celda de combustible de glicerol. Además, las simulaciones podrían usarse para determinar los parámetros adecuados de los electrodomésticos por ejemplo, el tamaño de los paneles fotovoltaicos, la capacidad de almacenamiento de las baterías y la celda de combustible, de modo que la vivienda se pueda usar sin conexión a la red durante un año completo.

El consumo de electricidad utilizado para esta simulación (ver línea negra en la Figura 3) se ha registrado en una vivienda del sector metropolitano de Bogotá que consta de 4 residentes. La vivienda está equipada con electrodomésticos normales (refrigerador, TV, lavadoras y secadoras).

El objetivo de las simulaciones con DstorageD era investigar si el consumo de la vivienda podría estar cubierta por energía solar FV, la batería y la unidad de respaldo. Para el almacenamiento, la batería de sal marina se ha utilizado como un dispositivo ideal, lo que significa que la batería puede descargarse al 100%. A diferencia de las baterías de iones de litio, la batería de sal marina puede soportar una descarga del 100% sin daños. La celda de combustible de glicerol es considerada como una unidad de respaldo, solo para usarse cuando la batería de sal marina y la energía solar FV no son capaces de proporcionar la electricidad requerida para la vivienda. En DstorageS, la celda de combustible de glicerol está programada para iniciarse cuando la batería está por debajo del 20% de su capacidad. Los resultados preliminares con BEopt y DstorageD para una vivienda con electricidad neutral en Colombia con energía solar FV, la batería de sal marina y una celda de combustible de glicerol, con perfiles de energía de una semana durante abril de 2019 se presentan en la Figura 3. El consumo de la vivienda (línea negra) y los perfiles

fotovoltaicos solares (línea amarilla) han sido proporcionados por los residentes de la vivienda y también modelados usando el programa *BEopt* y el análisis del tamaño de las baterías de sal marina y la celda de combustible de glicerol han sido modeladas con *DstorageS* [38].

Discusión de resultados

La Figura 3 muestra los datos del consumo de electricidad, la producción de energía solar FV, la batería de sal marina simulada y la producción de la celda de combustible de glicerol de respaldo durante la primera semana de abril de 2019. Se observó en detalle que el perfil general de la energía solar FV fue constante durante los días y se observó una producción máxima de electricidad de 2.6 kW. Por otro lado, el consumo de la vivienda mostró un valor máximo de 0.8 kW durante la primera semana de abril de 2019.

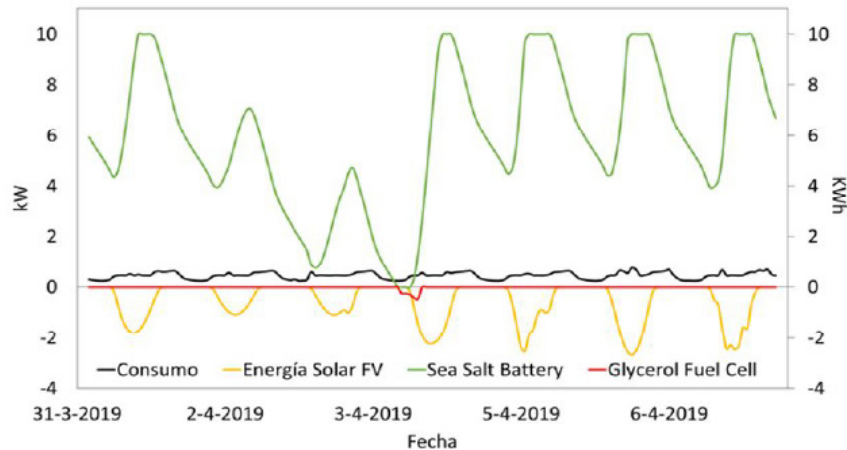


Figura 3. Resultados de *BEopt* y *DstorageS* de consumo de una vivienda con electricidad neutral en Colombia con energía solar FV, una batería de sal marina y una celda de combustible de glicerol durante la primera semana de abril 2019.

En la Figura 3, también se observa que la batería de sal marina almacenaba el excedente de electricidad que provenía de la energía solar FV durante el día. Además, la batería de sal marina se descarga típicamente durante la tarde y la noche (la batería modelada tiene un tamaño de 10 kWh). También, durante la noche, se observó que la batería de sal marina no siempre cubría el consumo requerido. En tales situaciones, la celda de combustible de glicerol de 2 kW (línea roja) cubrió esta demanda y estuvo activa hasta que la energía solar FV cubrió la demanda de la vivienda al día siguiente.

La Figura 4 muestra los datos del consumo de electricidad, la producción de energía solar FV, y la simulación del contenido de electricidad correspondiente de la batería de sal marina con la celda de combustible de glicerol durante una semana de noviembre de 2019. En detalle, se observó que el perfil de la energía solar FV se mantuvo constante durante esta semana y la producción máxima de electricidad fue de 2.8 kW.

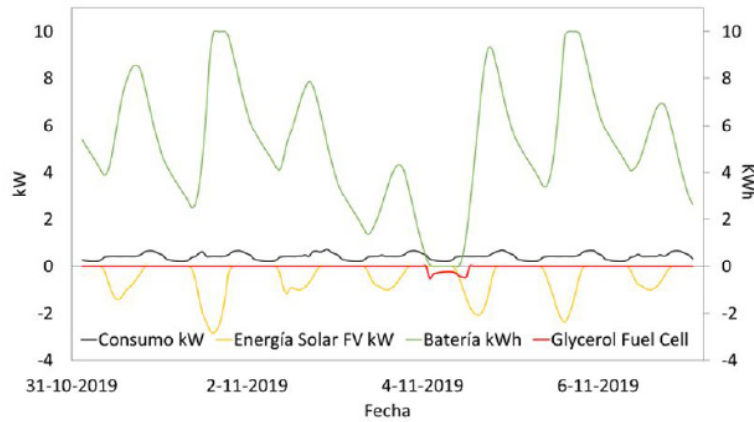


Figura 4. Resultados de *BEopt* y *DstorageS* de consumo de una vivienda con electricidad neutral en Colombia con energía solar FV, una batería de sal marina y una celda de combustible de glicerol durante la primera semana de noviembre de 2019

Por otro lado, el consumo de la vivienda muestra un valor máximo de 0.75 kW durante la semana de noviembre de 2019, que es menor que el consumo en la semana de junio de 2019 (0.8 kW). También, se observó que la batería de sal marina almacenaba el excedente de electricidad que provenía de la energía solar FV durante el día. Además, la batería de sal marina de 10 kWh se descargaba típicamente durante la tarde y la noche, y esto ocurrió durante períodos similares al mes de abril. Así mismo, durante la noche, se observó que la batería de sal marina no siempre cubría el consumo requerido. En tales situaciones, una celda de combustible de glicerol de 2 kW (línea roja) cubrió esta demanda y estuvo activa hasta que la energía solar FV cubrió la demanda de la vivienda al día siguiente.

Para resumir, se observó que una vivienda en el escenario presentado en Colombia era capaz de desconectarse de la red al tener un sistema de energía solar FV de 4 kW con una batería de sal marina de 10 kWh y una celda de combustible de glicerol de 2 kW durante las semanas antes mencionadas de abril y noviembre de 2019.

Los resultados anteriores están respaldados por la simulación creada por períodos de tiempo más largos, como se muestra en la Figura 5. La simulación se presenta durante un período de 12 meses, de enero a diciembre de 2019. Se observa que los resultados respaldan la simulación realizada para las semanas de abril y noviembre (ver Figuras 3 y 4). Sin embargo, se debe tener en cuenta que durante los meses de enero, marzo, abril, noviembre y diciembre, la celda de combustible de glicerol se usa con más frecuencia que durante el resto de los meses. Esto podría haberse esperado, en función de las diferencias climáticas bimodales de la zona.

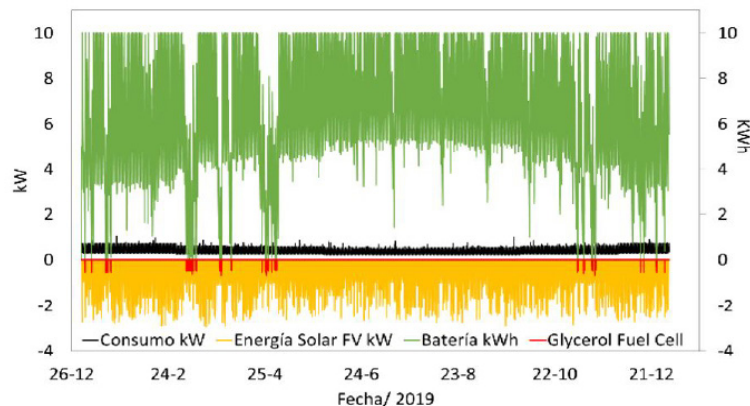


Figura 5. Resultados de *BEopt* y *DstorageS* de consumo de una vivienda con electricidad neutral en Colombia con energía solar FV, una batería de sal marina y una celda de combustible de glicerol durante el año 2019.

Conclusiones

Las viviendas con electricidad neutral pueden ser un activo importante para la red eléctrica; por una parte, para aumentar el acceso a la electricidad en el mundo y, por otra parte, para permitir una mejor integración de las fuentes de energía renovables en el sistema energético. Las iniciativas para mejorar el acceso a la electricidad son abundantes, pero la tasa de implementación de soluciones prácticas está muy por debajo del Objetivo de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas 7 Energía (ODS 7) para 2030. Se ha observado que este problema es más evidente en África Subsahariana, donde las tendencias actuales de acceso a la electricidad calculadas por el Banco Mundial indican que no podrán alcanzar el ODS 7 para 2030. Por otro lado, la introducción mundial actual de energía renovable a nivel de la vivienda conduce a un desequilibrio de la electricidad. En términos de balance entre consumo/ generación, que en el futuro puede causar escasez de electricidad en algunos períodos del año. Sorprendentemente, la implementación de la generación de energía renovable utilizando el enfoque de abajo hacia arriba de las viviendas con electricidad neutral está ocurriendo a un ritmo más rápido en los países en desarrollo que en los desarrollados.

En este documento, se demostró que para un estudio de caso en Colombia, el enfoque de abajo hacia arriba de las viviendas con electricidad neutral puede tener el potencial de crear una solución posiblemente más efectiva en el futuro para aumentar la generación renovable. El enfoque integra el uso de una nueva tecnología de batería (batería de sal marina), una celda de combustible (celda de combustible de glicerol) y un sistema inteligente de administración de energía descentralizada (DstorageS). Se observó que una vivienda en Colombia puede estar desconectada de la red, al tener una energía solar FV de 4 kW con una batería de sal marina de 10 kWh y una celda de combustible de glicerol de 2 kW funcionando durante todo el año.

Agradecimientos

Los autores agracen la participación y ayuda de la empresa Dr Ten BV y la Universidad de Twente en los Países Bajos durante esta investigación. Especial agradecimiento a Jairo Quintero y Ester Pulido por el acompañamiento y las correcciones en el documento.

Referencias

- [1] International Renewable Energy Agency, *Off-grid renewable energy solutions to expand electricity access: An opportunity not to be missed*. Abu Dhabi, 2019.
- [2] S. R. Khandker, H. A. Samad, Z. K. M. Sadeque, M. Asaduzzaman, M. Yunus, y A. K. E. Haque, “Surge in Solar-Powered Homes Experience in Off-Grid Rural Bangladesh Energy and Mining”, 2014.
- [3] Council of European Energy Regulators asbl, “Energy Quality of Supply Work Stream (EQS WS) CEER Benchmarking Report 6.1 on the Continuity of Electricity and Gas Supply”, 2018. Consultado: may 08, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/963153e6-2f42-78eb-22a4-06f1552dd34c>.
- [4] Sinteg, “Network operation and system stability: Sinteg”, 2020. <https://www.sinteg.de/en/specific-topics/network-operation-and-system-stability/> (consultado jun. 29, 2020).
- [5] A. Stijn, “Net-Metering RES LEGAL Europe”, 2019. <http://www.res-legal.eu/search-by-country/netherlands/single/s/res-e/t/promotion/aid/net-metering-1/lastp/171/> (consultado may 08, 2019).

- [6] H. Wirth y F. Ise, “Recent Facts about Photovoltaics in Germany”, 2020. Consultado: jun. 29, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/recent-facts-about-pv-in->.
- [7] E. Bellini, “Netherlands to replace net metering with new scheme for residential, commercial PV – PV Magazine International”, 2018. <https://www.pv-magazine.com/2018/06/18/netherlands-to-replace-net-metering-with-new-scheme-for-residential-commercial-pv/> (consultado may 08, 2019).
- [8] F. Solar, “Estado del mercado Solar Colombiano — The Solar Future Colombia”, 2018. <https://colombia.thesolarfuture.com/news-articles/2018/10/1/state-of-the-colombian-solar-market-39w6w> (consultado abr. 17, 2020).
- [9] The World Bank, “Is the world on track to deliver energy access for all?”, May 23, 2018. <http://www.worldbank.org/en/news/feature/2018/05/18/sustainable-development-goal-7-energy-access-all> (consultado may 25, 2018).
- [10] Netherlands Environmental Assessment Agency Paul L Lucas, “Towards universal electricity access in Sub-Saharan Africa A quantitative analysis of technology and investment requirements Policy Report”, 2017. Consultado: may 08, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2017-towards-universal-electricity-access-in-sub-saharan-africa-1952.pdf>.
- [11] F. Donou-Adonsou, “Technology, education, and economic growth in Sub-Saharan Africa”, *Telecomm. Policy*, ago. 2018, doi: 10.1016/J.TELPOL.2018.08.005.
- [12] Plug in the World, “Home | Mobisol Group | Innovative Off-Grid Solar Solutions | Designed in Germany”, 2017. <https://plugintheworld.com/> (consultado nov. 19, 2018).
- [13] M. Koepke y S. Groh, “Against the Odds: The Potential of Swarm Electrification for Small Island Development States”, *Energy Procedia*, vol. 103, pp. 363–368, dic. 2016, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2016.11.300.
- [14] G. Kyriakarakos y G. Papadakis, “Multispecies swarm electrification for rural areas of the developing world”, *Appl. Sci.*, vol. 9, núm. 19, 2019, doi: 10.3390/app9193992.
- [15] United Nations, “About the Sustainable Development Goals - United Nations Sustainable Development”, 2015. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (consultado dic. 27, 2019).
- [16] T. W. Bank, “Clean and Improved Cooking in Sub-Saharan Africa”, 2014. doi: 98664.
- [17] SEforALL, “About Us | Sustainable Energy for All (SEforALL)”. <https://www.seforall.org/about-us> (consultado mar. 19, 2020).
- [18] The World Bank, “Access to electricity (% of population) | Data”, 2017. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS?view=map> (consultado oct. 27, 2018).

- [19] J. Arlet, “Electricity Tariffs, Power Outages and Firm Performance: A Comparative Analysis”, 2017. Consultado: oct. 27, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://pubdocs.worldbank.org/en/444681490076354657/Electricity-Tariffs-Power-Outages-and-Firm-Performance.pdf>.
- [20] The World Bank, “Energizing Africa : Achievements and Lessons from the Africa Renewable Energy and Access Program (AFREA) Phase I”, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/25201/Energizing0Afr000AFREA0000phase0one.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [21] P. J. Burke y S. Kurniawati, “Electricity subsidy reform in Indonesia: Demand-side effects on electricity use”, *Energy Policy*, vol. 116, pp. 410–421, may 2018, doi: 10.1016/J.ENPOL.2018.02.018.
- [22] S. F. Kennedy, “Indonesia’s energy transition and its contradictions: Emerging geographies of energy and finance”, *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 41, pp. 230–237, jul. 2018, doi: 10.1016/J.ERSS.2018.04.023.
- [23] K. van Alphen, W. G. J. H. M. van Sark, y M. P. Hekkert, “Renewable energy technologies in the Maldives—determining the potential”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, núm. 8, pp. 1650–1674, oct. 2007, doi: 10.1016/J.RSER.2006.02.001.
- [24] I. Ali, G. Shafiullah, y T. Urmee, “A preliminary feasibility of roof-mounted solar PV systems in the Maldives”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 83, pp. 18–32, mar. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.10.019.
- [25] E. H. Lysen, *Report IEA-PVPS T9-12: 2012 : Pico Solar PV Systems for Remote Homes. IEA International Energy Agency*, 2013.
- [26] International Finance Corporation, “Lighting Global: Off-grid Solar Market Trends Report 2018”, 2018. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [27] E. Forde, “The ethics of energy provisioning: Living off-grid in rural Wales”, *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 30, pp. 82–93, ago. 2017, doi: 10.1016/J.ERSS.2017.06.018.
- [28] M. E. Menconi, S. dell’Anna, A. Scarlato, y D. Grohmann, “Energy sovereignty in Italian inner areas: Off-grid renewable solutions for isolated systems and rural buildings”, *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 14–26, ago. 2016, doi: 10.1016/J.RENENE.2016.02.034.
- [29] “Pecan Street Inc. |”, 2013. <http://www.pecanstreet.org/> (consultado may 08, 2020).
- [30] E. Codensa, “Servicio al usuario | Enel-Codensa”, 2020. <https://www.enel.com.co/es/personas.html> (consultado abr. 17, 2020).
- [31] TED The Energy Detective, “TED Pro Home Store”. <http://www.theenergydetective.com/prohomestore.html> (consultado oct. 16, 2018).
- [32] M. Van Der Laan, “GridFlex Heeten investigates feasibility of local energy market”, 2018. <https://>

ict.eu/wp-content/uploads/2018/10/ICT-GROUP_Casestudy-Energy-GFH_UK_Dig.pdf.

- [33] D. Quintero Pulido, G. Hoogsteen, M. ten Kortenaar, J. Hurink, R. Hebner, y G. Smit, “Characterization of Storage Sizing for an Off-Grid House in the US and the Netherlands”, *Energies*, vol. 11, núm. 2, p. 265, ene. 2018, doi: 10.3390/en11020265.
- [34] V. M. J. J. Reijnders y J. L. Hurink, “Testing Grid-Based Electricity Prices and Batteries in a Field Test. CIRED Workshop - Ljubljana , 7-8 June 2018 Paper 0500”, 2018, núm. 500, pp. 7–8.
- [35] D. F. Quintero Pulido, *Energy Storage Technologies for Off-grid Houses*, 1a ed. Enschede, The Netherlands: University of Twente, 2019.
- [36] D. Quintero Pulido, M. Ten Kortenaar, J. Hurink, y G. Smit, “A Practical Approach in Glycerol Oxidation for the Development of A Glycerol Fuel Cell”, *IMedPub J. Trends Green Chem.*, vol. 3, núm. 1:4, pp. 1–17, 2017, doi: 10.21767/2471-9889.100018.
- [37] E. D. of US, “Home | BEopt”, 2020. <https://beopt.nrel.gov/home> (consultado abr. 17, 2020).
- [38] G. Hoogsteen, J. L. Hurink, y G. J. M. Smit, “DEMKit: A Decentralized Energy Management Simulation and Demonstration Toolkit”, en *Proceedings of 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT-Europe 2019*, sep. 2019, p. 439, doi: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905439.
- [39] G. Hoogsteen y J. L. Hurink, “DEMKit | EWI - Energy”, 2019. <https://www.utwente.nl/en/eemcs/energy/demkit/> (consultado jun. 26, 2020).
- [40] M. Ten Kortenaar, “Seasalt battery | Dr Ten BV”, 2013. <http://www.drten.nl/zeezout-batterij/?lang=en> (consultado may 05, 2020).