

# Microrredes híbridas, una solución para países en vías de desarrollo

*Hybrid micronetworks, a solution for developing countries*

Paula Bastida-Molina<sup>1</sup>, Elías Hurtado-Pérez<sup>2</sup>, Carlos Vargas-Salgado<sup>3</sup>, David Ribó-Pérez<sup>4</sup>

## Resumen

Casi el 80% de la población sin acceso a la electricidad vive en zonas rurales remotas, donde su difícil acceso, gran distancia y alto coste de conexión a las redes de transporte instaladas hacen que la única solución para alimentar energéticamente a estas poblaciones sean las microrredes aisladas alimentadas por sistemas híbridos renovables (HRES). En este caso de estudio se detalla el proceso de diseño del HRES para abastecer energéticamente a una pequeña aldea de Malawi (África), denominada Masitala, la cual está aislada actualmente de la red eléctrica. El HRES consigue cubrir toda la demanda eléctrica de la población, estimada en 50 kW de consumo pico, en cualquier momento y con total fiabilidad. El sistema aprovecha los recursos solares, eólicos y de biomasa abundantes en la región para la generación eléctrica. La combinación de estos recursos asegura un mayor rango de cobertura de la demanda eléctrica que el proporcionado individualmente por cada tecnología, ya que las limitaciones de un tipo de energía son cubiertos por los restantes. Además, la disposición de un grupo de baterías en el HRES aseguraría la fiabilidad total del sistema. Se consigue así dar acceso a la energía eléctrica a Masitala, permitiendo su desarrollo de una forma sostenible y eficaz.

## Palabras clave

Sistema híbrido renovable, energías renovables, zonas rurales, recursos, solar, eólico, biomasa, baterías.

## Abstract

*Almost 80% of the population without access to electricity live in rural remote areas, where its difficult access, long distance and high cost of connection to installed transport network make isolated micronetworks with hybrid renewable energy systems (HRES) the unique solution to electrically satisfy these communities. In this case of study, HRES design process to electrically power a small and isolated village in Malawi (Africa), called Masitala, is detailed. All the electrical demand of the population, estimated at 50 kW of maximum power, can be reliably and in every moment covered by HRES. The system takes advantage of solar, wind and biomass plentiful zone resources for electrical generation. The combination of all these resources ensures a wider electrical supply range than the one provided by every single technology, since limitations of one energy type are solved by the remaining technologies. Additionally, the group of batteries set out in HRES would guarantee the completely system reliability. In this way, it could be possible to give electrical access to Masitala, allowing its development in a sustainable and efficient way.*

## Keywords

*Hybrid renewable system, renewable energies, rural zones, resources, solar, wind, biomass, batteries.*

Recibido / received: 20/06/2019. Aceptado / accepted: 28/01/2020.

1 Instituto Universitario de Ingeniería Energética, Camino de Vera, s/n, edificio 8E, 2a planta, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain, paubasmo@etsid.upv.es.

2 Instituto Universitario de Ingeniería Energética, Camino de Vera, s/n, edificio 8E, 5a planta, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain, ejhurtado@die.upv.es

3 Instituto Universitario de Ingeniería Energética, Camino de Vera, s/n, edificio 8E, 2a planta, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain, carvarsa@upvnet.upv.es

4 Instituto Universitario de Ingeniería Energética, Camino de Vera s/n, edificio 8E, 2a planta, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain, david.ribo@iie.upv.es

Autor para correspondencia: Paula Bastida-Molina. E-mail: paubasmo@etsid.upv.es.



Niños africanos recogen agua para sus familias, lejos de su hogar, en una aldea de Malawi. Foto: Shutterstock.

## Introducción

El acceso por parte de la población a la electricidad se ha convertido en uno de los índices más importantes para el desarrollo de un país. Como afirman distintas organizaciones como el Banco Mundial (WB) y Agencia Internacional de la Energía (IEA), el acceso a la electricidad proporciona a los distintos países los recursos necesarios para mejorar aspectos clave como educación, sanidad, redes de agua, comunicaciones o adaptación y mitigación al cambio climático. Sin embargo, hay aún cerca de 1 billón de personas sin acceso a la electricidad (IEA, 2018). De estas, el 80% vive en zonas rurales aisladas del África subsahariana, el sudeste asiático y Sudamérica, principalmente.

Los costes de inversión que tendrían que asumir estas comunidades para poder tener acceso a la red eléctrica son muy altos, prácticamente prohibitivos. Por ello, las microrredes aisladas alimentadas por sistemas híbridos renovables (HRES, por sus siglas en inglés) se presentan como una solución que permitiría dar respuesta a esta necesidad de las comunidades aisladas de electricidad (IEA, 2017). Estos sistemas permiten cubrir la demanda eléctrica de las poblaciones

rurales utilizando recursos renovables abundantes en la región, como la energía solar, eólica, biomasa, etc. El uso híbrido y combinado de los distintos tipos de tecnologías supera las restricciones de los sistemas renovables convencionales, puesto que las limitaciones de un tipo de tecnología se suplen con las características del resto de fuentes (Kartite & Cherkaoui, 2019). Además, los HRES cuentan con el respaldo de baterías o grupos electrógenos, haciéndolos así sistemas de elevada fiabilidad.

En los últimos años, se han llevado a cabo numerosos proyectos de implantación de HRES en poblaciones rurales aisladas de la red eléctrica. Algunos de ellos son el proyecto llevado a cabo en Necoclí (Colombia) en 2009, Kinshasa (República Dominicana del Congo) en 2012 (Hurtado, Peñalvo-López, Pérez-Navarro, Vargas & Alfonso, 2015) y en Choco (Colombia) en 2015. Estos proyectos han verificado la idoneidad de utilizar HRES en zonas aisladas de la red eléctrica, especialmente en comunidades de África y Sudamérica, donde las horas de sol y los recursos de biomasa son abundantes.

En este artículo se plantea el diseño de una instalación que se prevé desa-

rollar en una pequeña aldea de Malawi, en África, denominada Masitala. Esta comunidad ha sufrido numerosos problemas agrícolas y de sequía en los últimos tiempos, lo que ha conducido a una desnutrición generalizada de la población. La actuación de William Kamkwamba en 2010 logró salvar a esta pequeña aldea de una fuerte hambruna y se dio a conocer la comunidad en el mundo. Este joven, originario de Masitala, consiguió construir un molino de viento utilizando restos de chatarra, troncos de árbol, piezas de automóvil etc. viendo las imágenes de un libro en inglés que encontró en la biblioteca, sin saber él nada de inglés. Con este rudimentario molino de viento fue posible generar una pequeña cantidad de energía con la que se logró bombear agua para regar los cultivos, mitigando el hambre de los habitantes de la población (Dieterich, 2018).

Sin embargo, este pequeño molino es insuficiente y poco fiable para cubrir toda la demanda energética de la aldea. Además, tan solo es posible utilizarlo en momentos concretos de tiempo. Se considera así que la aldea está aislada eléctricamente.

Por ello, se pretende diseñar un sistema híbrido renovable que permita

cubrir las necesidades energéticas de Masitala utilizando recursos solares, eólicos y de biomasa y como respaldo un sistema de almacenamiento en baterías.

### Curva de consumo diaria

El primer paso para poder dimensionar un HRES es conocer la curva de consumo diaria de la población donde se instalará. Sin embargo, en este caso de estudio no es posible recopilar datos reales, ya que actualmente la población de Masitala se encuentra aislada de la red. El método que se utiliza para ello consiste en estimar cuáles serían los consumidores principales de Masitala y estimar su curva de consumo diaria para asegurar así una calidad de vida digna a sus habitantes (Bhuiyan & Ali Asgar, 2003). Para una aldea como Masitala, se establece que estos consumos serían una biblioteca, una escuela de educación infantil-primaria, una escuela de educación secundaria, un consultorio médico, las residencias de los habitantes (70 en total), la red de alumbrado público y una bomba de extracción de agua. Así, es posible obtener finalmente la curva de consumo total como el sumatorio de cada una de las curvas de consumo diario de cada consumidor establecido. La figura 1 presenta el resultado de la estimación. En ella se puede observar que la potencia máxima estimada es de 50 kW a última hora de la noche.

### Elección de las distintas tecnologías

La elección de las distintas tecnologías que compondrán el HRES es un punto clave del proceso de diseño (Mandelli, Barbieri, Mereu, & Colombo, 2016). La demanda de energía estimada para la población, la abundancia de los recursos y la viabilidad técnica y económica son los principales factores que se han tenido en cuenta para ello (Hussain, Norton, & Duffy, 2017).

El elevado número de horas solares que se dan en Masitala a lo largo del año (2.362 HSP), sumadas a la fácil instalación de los paneles solares fotovoltaicos y su precio competitivo hacen que la energía solar resulte idónea para el HRES. Además, se dispone de forma abierta de la herramienta PVGIS, con la cual es posible obtener la curva de radiación solar en cada mes del año.

La ubicación de Masitala hace que

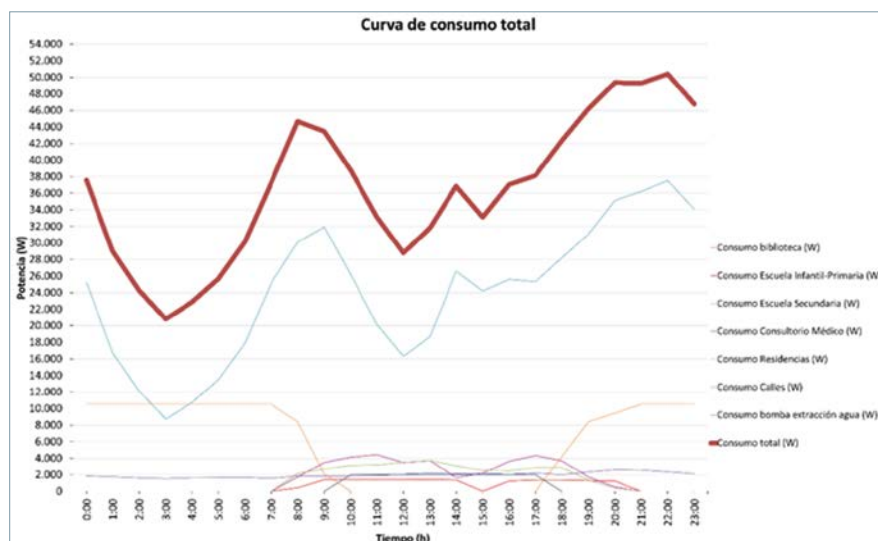


Figura 1. Curva de consumo total.

el viento sea también un recurso abundante en la aldea. El patrón de vientos (dirección, frecuencia, etc.) se obtiene con la herramienta Global Wind Atlas, gratuita y de libre uso. Esto hace que la energía eólica sea una fuente de energía adecuada también para el sistema, aunque se dispondrá en menor medida que la solar por su mayor dificultad de instalación, operación y coste. Esto contribuye al aumento de la fiabilidad del sistema, principalmente en épocas con mucha nubosidad.

En Masitala también hay especies leñosas de alto poder calorífico muy abundantes en la región. Así, la energía de la biomasa también se va a utilizar en el HRES. Sin embargo, va a incluirse como una tecnología secundaria, que solo entrará en funcionamiento en momentos esporádicos, ya que su funcionamiento continuado supondría graves problemas en el equipo de biomasa (obstrucción, alquitranes, etc.).

Otros posibles tipos de energía por incluir en el HRES podrían ser la energía hidráulica y la geotérmica. Sin embargo, la gran infraestructura que necesitarían y su elevado coste hacen que estas tecnologías sean descartadas.

Como sistema de respaldo para almacenar los excedentes de energía cuando el potencial de generación supera la demanda de energía, se decide utilizar baterías. Podría utilizarse también grupos electrógenos, por su amplia madurez tecnológica, facilidad de uso e instalación. Sin embargo, los

grupos electrógenos son descartados por su elevado índice de emisiones contaminantes (Arabzadeh Saheli, Fazelpour, Soltani & Rosen, 2019).

Tras este breve análisis, se determina que las fuentes de energía que formarán el HRES serán la energía solar, la eólica y de biomasa, junto con el respaldo de un grupo de baterías.

### Descripción del HRES

En general, el objetivo de cualquier HRES es asegurar que la demanda energética de la población se cubra con una elevada fiabilidad (Pérez-Navarro et al, 2016). Para el caso de estudio, el HRES deberá cubrir la demanda eléctrica de Masitala, a partir de los recursos renovables, contando adicionalmente con el apoyo de un sistema de almacenamiento en baterías.

El inversor-cargador de batería bidireccional Sunny Island, es el *cerebro* del sistema. Permite crear la red aislada de 230-400 V en corriente alterna cuando toma la energía de las baterías. Los recursos de generación solar y eólica están conectados a esta red, así como los consumos de la población. Por otro lado, el grupo electrógeno del equipo de biomasa está directamente conectado a Sunny Island. En los momentos en que actúa la biomasa, Sunny Island puede sincronizarse y conectarse con el grupo electrógeno. En esas situaciones, la red deja de estar formada por Sunny Island, será el grupo electrógeno de la biomasa el elemento que determine los parámetros de la red (Fig. 2).

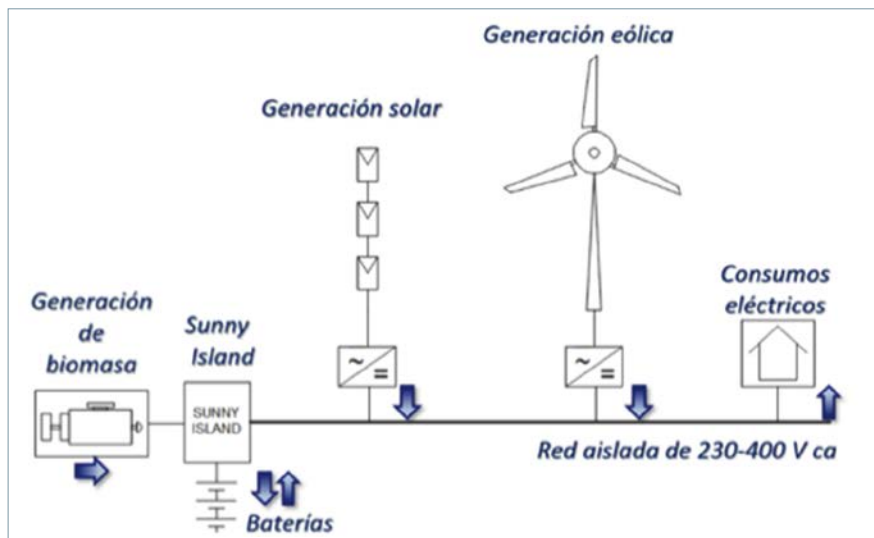


Figura 2. Configuración del HRES.

Sistemas de funcionamiento. Sistema híbrido renovable				
Generación solar y/o eólica	Excedentes de energía	Grupo electrógeno	Baterías	Elemento que forma la red
Si, cubre la demanda energética	No	No actúa	No actúan	Sunny Island
Si, cubre la demanda energética	Si. Carga de baterías	No actúa	No actúan	Sunny Island
No cubre toda la demanda energética	No	Si actúa	No actúan	Grupo electrógeno
	No	No actúa	Si actúan	Sunny Island
	No	Si actúa	Si actúan	Grupo electrógeno

Tabla 1. Situaciones de funcionamiento del HRES.

Las posibles situaciones de generación-consumo son descritas a continuación y recopiladas en la tabla 1:

- Si con la generación solar-eólica fuese posible cubrir toda la demanda eléctrica de Masitala, sin que se produjesen excedentes de energía, ni la ayuda del grupo electrógeno de la biomasa ni la de las baterías serían necesarias. No habría tampoco excedentes de energía y Sunny Island sería el encargado de establecer la red.
- En el caso de que la generación solar-eólica pudiera cubrir toda la demanda eléctrica de Masitala y, además, se produjeran exceden-

tes, con estos sería posible cargar las baterías. En esta situación ni el grupo electrógeno ni las baterías actuarían. La red la formaría Sunny Island.

- La tercera situación que podría darse es que los recursos solares-eólicos no fueran suficientes para suplir la demanda eléctrica de Masitala. En este caso, podrían darse tres nuevas situaciones:
  - La actuación del grupo electrógeno de la biomasa permitiría cubrir toda la demanda, sin necesidad de que actuaran las baterías. En este caso, sería el grupo electrógeno el que formaría la red.

- El grupo electrógeno de la biomasa no entra en funcionamiento, sino las baterías. En este caso, Sunny Island sería el encargado de formar la red.
- Si la demanda de energía es cubierta tanto por el grupo electrógeno de la biomasa como por las baterías, el grupo electrógeno es el que formará la red.

Esta secuencia de funcionamiento coincide con la descrita en la fase de estudio de selección de las distintas tecnologías que formarán el HRES. La demanda energética se cubre con los recursos solares y eólicos, en primer lugar, después con los de la biomasa y, por último, con las baterías.

### Dimensionado del HRES

El dimensionado del HRES se realiza siempre para el mes más desfavorable, es decir, el mes con menor producción energética, para asegurar una mayor fiabilidad del sistema (Bastida Molina, 2018). Conocido este mes, es necesario realizar un extenso estudio para determinar los patrones climatológicos que podrían darse en la población en dicho mes: cuántos días suelen ser soleados, cuántos suelen ser ventosos, cuantos días suelen ser soleados y ventosos a la vez y la cantidad de días seguidos que cumplen estas características. La herramienta utilizada para ello ha sido Meteoblue. Realizando este estudio para Masitala, se establecen finalmente cinco patrones climatológicos (Figura 3).

Para cada uno de estos patrones climatológicos (hipótesis), se calcula una curva inicial de producción solar-eólica (Fig. 4). Seguidamente, en cada una de las hipótesis se añade la curva de producción de biomasa (Fig. 5). Para ello, hay que tener en cuenta una serie de características, detalladas a continuación (Hurtado, Peñalvo-López, Pérez-Navarro, Vargas, & Alfonso, 2015).

- La biomasa deberá actuar en los momentos en que haya déficit de energía. Para conocer esos momentos, se superponen las curvas de producción solar-eólica con la curva de consumo diario en cada hipótesis y para todos los días (Fig. 6). Así, es posible conocer en qué momentos debe actuar la biomasa.
- El número de horas de funcionamiento del equipo de biomasa no

ENERGÍA SOLAR		ENERGÍA EÓLICA		ENERGÍA SOLAR		ENERGÍA EÓLICA		ENERGÍA SOLAR		ENERGÍA EÓLICA		ENERGÍA SOLAR		ENERGÍA EÓLICA	
Día 1	✓	✓	Día 1	✗	✓	Día 1	✓	✗	Día 1	✓	✓	Día 1	✓	✓	
Día 2	✓	✓	Día 2	✗	✓	Día 2	✗	✓	Día 2	✓	✗	Día 2	✓	✗	
Día 3	✗	✓	Día 3	✓	✗	Día 3	✓	✗	Día 3	✓	✗	Día 3	✓	✗	
Día 4	✗	✓	Día 4	✓	✗	Día 4	✓	✗	Día 4	✓	✗	Día 4	✓	✗	
Día 5	✗	✗	Día 5	✗	✗	Día 5	✓	✗	Día 5	✗	✗	Día 5	✗	✗	
Día 6	✓	✗	Día 6	✗	✗	Día 6	✓	✗	Día 6	✗	✓	Día 6	✗	✓	
Día 7	✓	✗	Día 7	✗	✗	Día 7	✓	✗	Día 7	✗	✓	Día 7	✗	✓	
Día 8	✓	✗	Día 8	✓	✗	Día 8	✓	✓	Día 8	✓	✗	Día 8	✓	✗	
Día 9	✓	✗	Día 9	✓	✗	Día 9	✓	✓	Día 9	✓	✗	Día 9	✓	✗	
Día 10	✓	✓	Día 10	✓	✗	Día 10	✓	✗	Día 10	✓	✗	Día 10	✓	✗	
Día 11	✓	✓	Día 11	✓	✗	Día 11	✓	✗	Día 11	✓	✓	Día 11	✓	✓	
Día 12	✓	✓	Día 12	✓	✓	Día 12	✗	✗	Día 12	✗	✓	Día 12	✗	✓	
Día 13	✗	✗	Día 13	✓	✓	Día 13	✗	✗	Día 13	✗	✗	Día 13	✗	✗	
Día 14	✗	✗	Día 14	✗	✗	Día 14	✗	✗	Día 14	✗	✗	Día 14	✗	✗	
Día 15	✗	✗	Día 15	✓	✓	Día 15	✗	✓	Día 15	✗	✓	Día 15	✗	✓	
Día 16	✓	✓	Día 16	✗	✓	Día 16	✗	✓	Día 16	✗	✓	Día 16	✗	✓	
Día 17	✗	✓	Día 17	✗	✓	Día 17	✗	✗	Día 17	✗	✓	Día 17	✓	✓	
Día 18	✗	✓	Día 18	✗	✓	Día 18	✗	✗	Día 18	✓	✓	Día 18	✓	✓	
Día 19	✗	✓	Día 19	✗	✓	Día 19	✗	✓	Día 19	✓	✓	Día 19	✓	✓	
Día 20	✗	✓	Día 20	✓	✓	Día 20	✓	✗	Día 20	✓	✓	Día 20	✓	✓	

Figura 3. Patrones climatológicos.

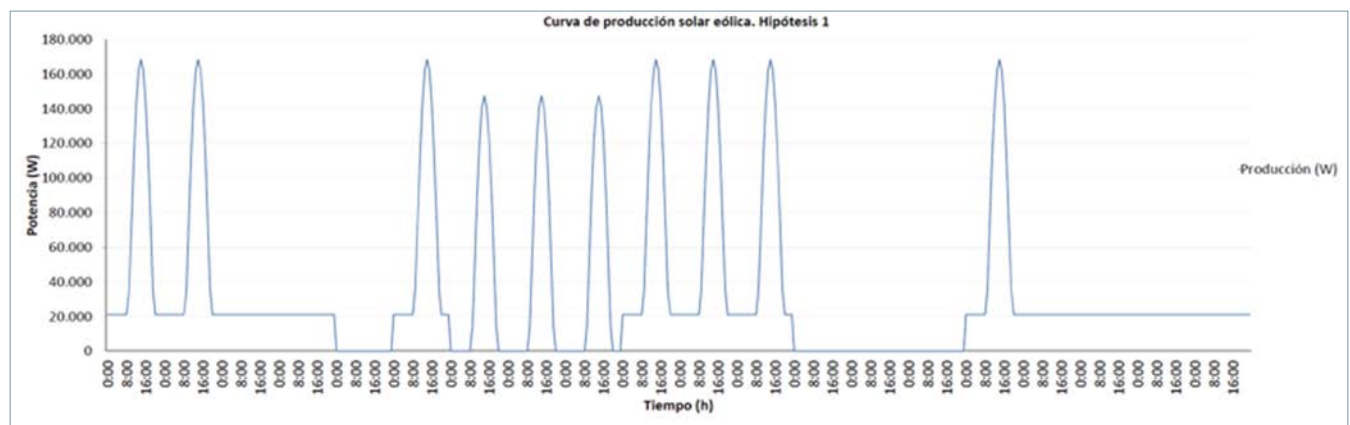


Figura 4. Curva de producción solar-eólica. Hipótesis 1.

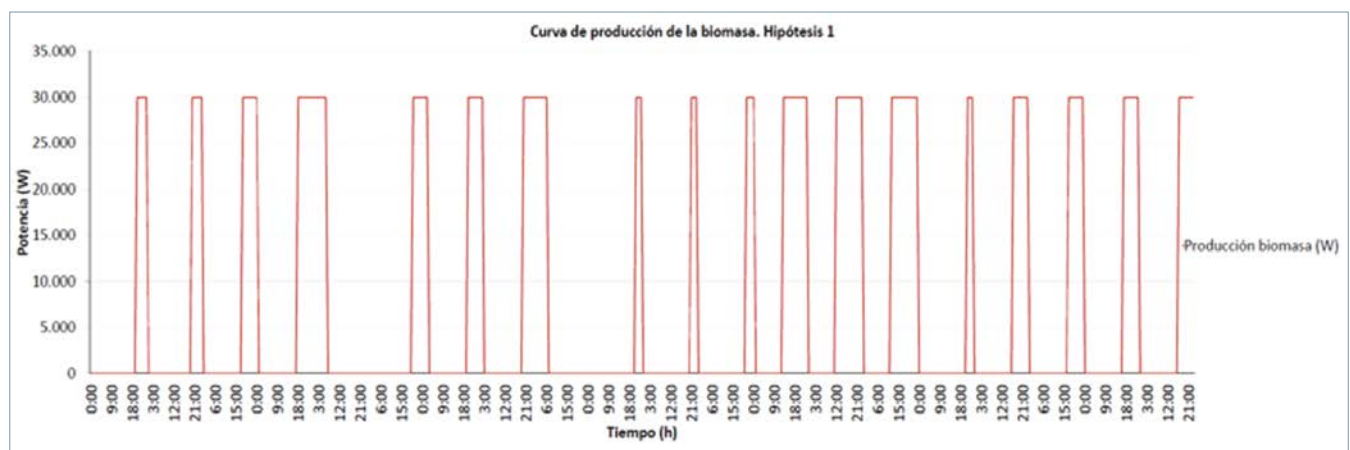


Figura 5. Curva de producción de la biomasa. Hipótesis 1.

es fijo, sino que variará en función del día.

- Se debe evitar siempre el funcionamiento intermitente del equipo de biomasa.

El sumatorio de los tres tipos de producción (solar, eólica y biomasa) corresponde a la curva de producción total (Fig. 7).

Como elemento de apoyo, se ha decidido utilizar baterías, que actuarán cuando el resto de tecnologías no lleguen a cubrir la demanda de energía. Es necesario superponer las curvas de producción y de consumo totales (Fig. 8) para ver en qué momentos se producen excedentes o déficits de energía, ya que las baterías se cargarán

cuando haya excedentes de energía y actuarán (se descargarán) cuando haya déficit (Fig. 9).

Una vez conocida la metodología, se implementa un proceso iterativo a partir de los datos iniciales para poder dimensionar el sistema y determinar qué cantidad de recursos de generación (solar, eólica, biomasa y baterías)

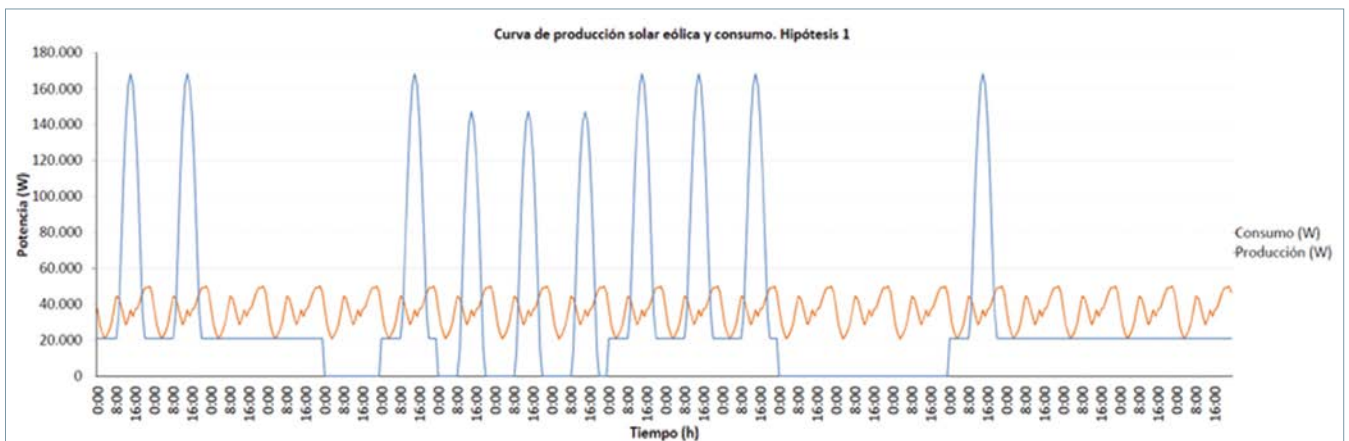


Figura 6. Curva de producción solar, eólica y consumo. Hipótesis 1.

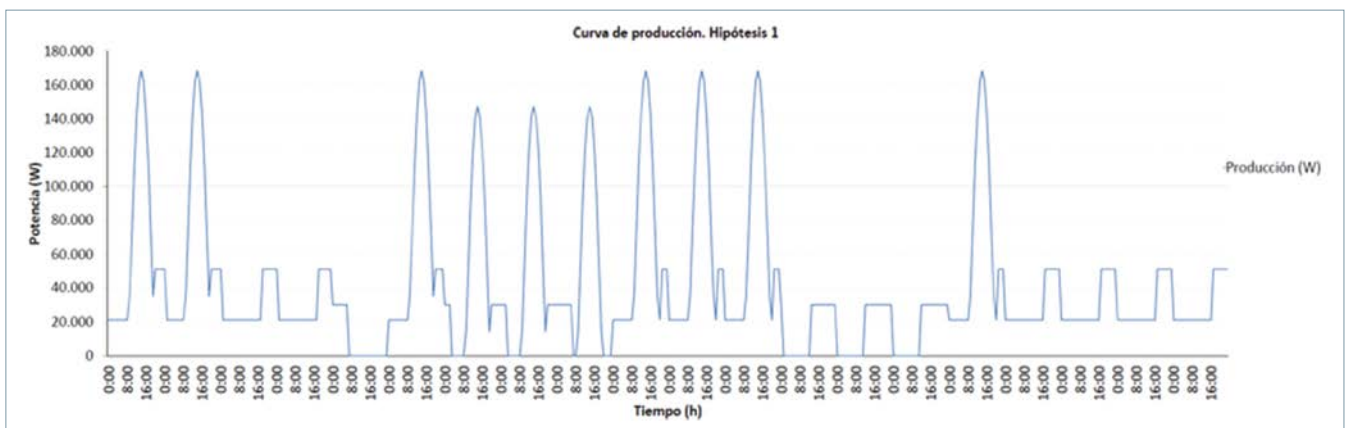


Figura 7. Curva de producción total. Hipótesis 1.

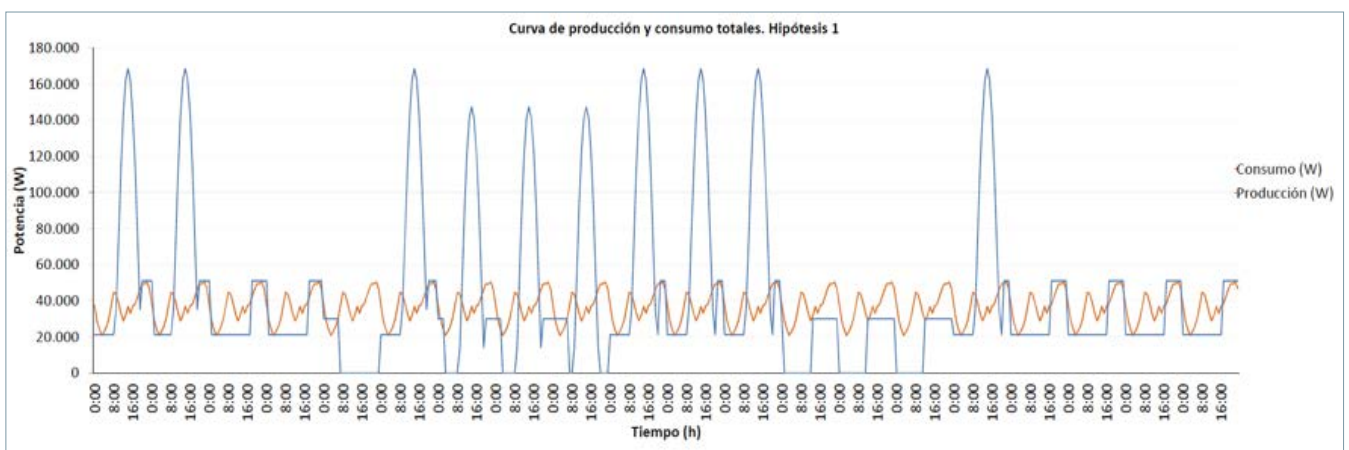


Figura 8. Curva de consumo y producción totales. Hipótesis 1.

son necesarios. Se considera que el proceso iterativo ha finalizado cuando en las cinco hipótesis propuestas se alcanzan los requisitos que se describen a continuación:

- Los recursos de generación no deben ser utilizados todos en la misma proporción. El estudio previo acerca de las tecnologías a introdu-

cir en el HRES determinó que el recurso más abundante debía ser el solar, seguido de la energía eólica y, por último, biomasa. La función de apoyo de las baterías, similar a la de la biomasa, hace que estas estén en una proporción muy similar a la biomasa.

- El equipo de biomasa no puede

funcionar de forma intermitente, sino que lo hace en un único periodo del día.

- Para evitar problemas de funcionamiento en las baterías, su energía almacenada nunca puede bajar por debajo del 30% de la nominal.
- La potencia cargada o descargada instantáneamente por las baterías

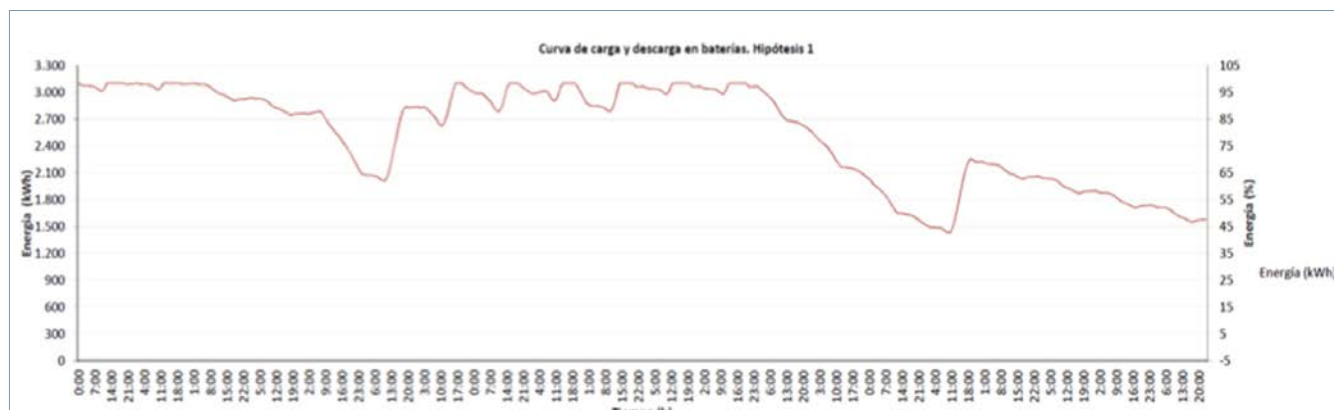


Figura 9. Curva de carga y descarga de baterías. Hipótesis 1.

Diseño final del Sistema Híbrido Renovable	
Energía solar	1.200 placas, de 255Wp cada placa
Energía eólica	8 aerogeneradores, de 10 kW cada uno
Energía de la biomasa	Grupo electrógeno para biomasa de 36 kW
Baterías	líneas en paralelo, capacidad de 4.620 Ah cada batería

Tabla 2. Diseño final del sistema híbrido renovable.

debe ser siempre inferior al 10% de su energía nominal.

Aplicando este proceso, es posible obtener la cantidad de recursos de generación y respaldo que permitirían cubrir la demanda energética de Masitala, cumpliendo los requisitos expuestos en las 5 hipótesis. De este modo, el sistema está formado por 1.200 placas de 255 W<sub>p</sub>, 8 aerogeneradores de 10 kW, un grupo electrógeno para la biomasa de 36 kW, 14 líneas en paralelo de baterías de 4620 Ah cada una y 21 Sunny Island.

### Conclusiones

El HRES objeto de estudio permitiría solucionar el principal problema que asola actualmente a Masitala: el aislamiento eléctrico. El uso de recursos renovables que se encuentran de forma muy abundante (biomasa) o de forma ilimitada (sol, viento) en la población es aprovechado para dar solución a este gravísimo problema. Los recursos son combinados de forma adecuada en el HRES dimensionado, que aseguraría la demanda energética de la población en cualquier situación, apoyándose de

un grupo de baterías para una total fiabilidad. Esto supondría un gran avance tecnológico y social para la población, que vería como su nivel de vida mejora significativamente en aspectos tan diversos como sanidad, comunicaciones y educación, entre otros muchos. Además, desde el punto de vista medioambiental, se consigue alimentar toda una población con un balance de emisiones nulo durante la generación eléctrica aprovechando los recursos naturales disponibles.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido respaldado en parte por la Administración pública de Valencia bajo la beca ACIF/2018/106 y por la Administración pública de España bajo la beca FPU2016/00962.

### Referencias

Arabzadeh Saheli M, Fazelpour F, Soltani N, & Rosen MA (2019). Performance analysis of a photovoltaic/wind/diesel hybrid power generation system for domestic utilization in winnipeg, manitoba, canada. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2018;38(2):548-62.

Bastida Molina P (2018). Diseño de un sistema híbrido de energía para el suministro eléctrico a una comunidad aislada de 50 kW de potencia máxima a través de recursos solares, eólicos y de biomasa. RiuNET. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/110128>

Bhuiyan MMH & Ali Asgar M. Sizing of a stand-alone photovoltaic power system at Dhaka. *Renewable Energy*. 2003;28(6):929-38.

Dieterich M (2018). Sustainable development as a driver for innovation and employment. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*. 2018;12(1/2):2-12.

Hurtado E, Peñalvo-López E, Pérez-Navarro Á, Vargas C, & Alfonso D. Optimization of a hybrid renewable system for high feasibility application in non-connected zones. *Applied Energy*. 2015;155:308-14.

Hussain CMI, Norton B & Duffy A. (2017). Technological assessment of different solar-biomass systems for hybrid power generation in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;68: 1115-29.

IEA. (2017). Special Report: Energy Access Outlook.

IEA. (2018). World Energy Outlook 2018.

Kartite J & Cherkaoui M. (2019). Study of the different structures of hybrid systems in renewable energies: A review. *Energy Procedia*. 2019;157:323-30.

Mandelli S, Barbieri J, Mereu R & Colombo E. Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;58:1621-46.

Pérez-Navarro A, Alfonso D, Ariza HE, Cárcel J, Correcher A, Escrivá-Escrivá et al. Experimental verification of hybrid renewable systems as feasible energy sources. *Renewable Energy*. 2016;86:384-91.