



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ELECTRIFICACIÓN RURAL HÍBRIDA
PARA PEQUEÑAS NECESIDADES:
SOLAR Y EÓLICA**

Autor: Laura Ruiz Lozano

Directores:

Ramón Alcalá Espinosa de los Monteros

José Francisco Baena Domínguez

Madrid

17 de julio de 2021

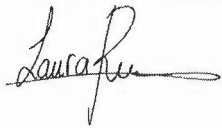
Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

**ELECTRIFICACIÓN RURAL HÍBRIDA PARA PEQUEÑAS
NECESIDADES: SOLAR Y EÓLICA**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2020/2021 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: LAURA RUIZ LOZANO

Fecha: 15/ 07 / 2021



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: RAMÓN ALCALÁ ESPINOSA DE LOS MONTEROS

Fecha: 15/ 07 / 2021

A mi familia

A mis amigos

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a la Universidad Pontificia Comillas - ICAI - la enseñanza y los valores transmitidos a lo largo de los años que he pasado entre sus paredes. Sin duda, todas las experiencias vividas me han hecho mejor persona, y sobretodo mejor profesional capaz de afrontar cualquier reto que se me presente.

En segundo lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores Ramón Alcalá y José Baena por su paciencia y dedicación, los cuales confiaron en mi, impidiendo que perdiera los ánimos en este proyecto. Por otro lado, la ayuda incondicional de la Fundación de Ingenieros de ICAI los cuales me motivaron a realizar un proyecto de ingeniería con propósito de Manos Unidas. Gracias también al apoyo absoluto de Marta Reina y Beatriz del Río por haberme dado la oportunidad de realizar un proyecto con tanto impacto.

Cabe mencionar a todos los colaboradores de MMUU que han puesto sus conocimientos al servicio de la Fundación, su ayuda desinteresada ha hecho que este trabajo salga adelante sin ningún tipo de problema.

Por último, y más importante, este camino no hubiera sido posible sin el amor y apoyo incondicional de mi familia, con especial mención a mis padres, que han sido mi mayor apoyo y que me han hecho seguir adelante en momentos en los que ni siquiera creía en mí misma.

A todos y cada uno de vosotros, ¡gracias!

Laura Ruiz Lozano

17 de julio de 2021

ONG Manos Unidas

Manos Unidas, la ONG de desarrollo de la Iglesia Católica y de voluntarios

Manos Unidas es una ONG española que pertenece a la Iglesia Católica, basándose sus fundamentos en la Doctrina social de la Iglesia. Su principal objetivo es la erradicación de la pobreza y todas las consecuencias que derivan de esta como la hambruna, la miseria, le enfermedad, la injusticia, la desigualdad de oportunidades... Esta organización no gubernamental está presente en 58 países repartidos en 3 continentes: África, Asia y América Latina, priorizando las comunidades con un Índice de Desarrollo Humano más bajo.

Principalmente, uno de los sectores donde se ha invertido mucho tiempo y dinero es en educación, puesto que es uno de los pilares fundamentales en el buen desarrollo de una comunidad, pero donde se centra este proyecto es en el sector de abastecimiento eléctrico a comunidades aisladas que cuenten con pocas ayudas. Se busca un abastecimiento limpio que contribuya además a la mejora del medio ambiente y el cambio climático. [MMU21]



- Misión
Organización que lucha contra el hambre, la deficiente nutrición, la miseria, la enfermedad, el subdesarrollo y la falta de educación
- Visión
Lo que buscan es que cada persona pueda ser agente responsable de su mejora material, moral y espiritual y goce de una vida digna
- Valores
La cultura que busca orientar la organización, se enfoca a la consecución de unos valores finales, como por ejemplo: la dignidad de la persona, el bien común, la solidaridad...

Índice general

ONG Manos Unidas	IX
Resumen	XVII
Abstract	XIX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Situación actual	2
2. Sistemas híbridos	7
2.1. ¿Por qué un sistema híbrido?	7
2.2. Diferencias entre los distintos sistemas híbridos	8
2.3. Diseño de los sistemas híbridos	9
3. Marco teórico	11
3.1. Componentes	11
3.1.1. Módulos solares fotovoltaicos	11
3.1.2. Aerogeneradores de pequeña potencia	13
3.1.3. Inversores	15
3.1.4. Reguladores	16
3.1.5. Baterías	16
3.1.5.1. Diseño del sistema de baterías	17
3.2. Tipo de sistemas aislados	18
3.2.1. Sistemas aislados con acoplamiento en CA	19
3.2.2. Sistemas aislados con acoplamiento en CC	19
3.2.3. Sistemas aislados mixtos con acoplamiento en CA y CC	20
3.3. Montaje modular de sistemas aislados	20
3.3.1. Sistema sencillo monofásico	22
3.3.2. Sistema monofásico de clúster único	22
3.3.3. Sistema trifásico de clúster único	23
3.3.4. Sistema multiclúster	23
4. Recursos energéticos	25
4.1. Recurso solar	25
4.1.1. El concepto de hora solar pico - HSP	26
4.2. Recurso eólico	27
4.2.1. Medición del viento	28
4.2.2. Distribución de Weibull	30
4.2.3. Aerogeneradores - curva de potencia	33

5. Estudio de casos	35
5.1. Sinendé, Borgou, Benin	35
5.1.1. Recurso solar	36
5.1.2. Recurso eólico	36
5.1.3. Estudio	37
5.1.4. Conclusiones	40
5.2. Tanaff, Sédhiou Region, Senegal	41
5.2.1. Recurso solar	41
5.2.2. Recurso eólico	42
5.2.3. Estudio	42
5.2.4. Conlusiones	46
5.3. Kouba Olanga, Borkou, Chad	46
5.3.1. Recurso solar	47
5.3.2. Recurso eólico	48
5.3.3. Estudio	48
5.3.4. Conclusiones	52
5.4. Desarrollos futuros	52
A. Objetivos de Desarrollo Sostenible	53
B. Modelo MESH	57
B.1. Código de colores	58
B.2. Descripción de las hojas	58
B.2.1. Bloque 1: Perfil de consumo	58
B.2.2. Bloque 2: Recursos solar y eólico	59
B.2.3. Bloque 3: Aerogeneradores	60
B.2.4. Bloque 4: Evaluación de sistema híbrido	60
C. Aerogeneradores	63
D. Perfil Solar	65
E. Instalación fotovoltaica Sonka, Benin	67
Referencias	71

Índice de figuras

Figura 3.1. Panel monocristalino	11
Figura 3.2. Panel policristalino	12
Figura 3.3. Panel capa fina	12
Figura 3.4. Aerogenerador de eje horizontal con una, dos y tres palas	14
Figura 3.5. Aerogenerador de eje vertical	14
Figura 3.6. Inversor SMA Sunny Boy	15
Figura 3.7. Inversor SMA Sunny Island	16
Figura 3.8. Ejemplo de un sistema con acoplamiento de CA	19
Figura 3.9. Ejemplo de un sistema con acoplamiento de CC	19
Figura 3.10. Ejemplo de un sistema con acoplamiento en CA y CC	20
Figura 3.11. Principio de un sistema sencillo monofásico	22
Figura 3.12. Principio de un sistema monofásico de clúster único	23
Figura 3.13. Principio de un sistema trifásico de clúster único	23
Figura 3.14. Principio de un sistema multiclúster	24
Figura 4.1. Mapa de radiación solar kWh/kWp	25
Figura 4.2. Representación de las HSP e irradiancia horaria en julio en el hemisferio norte	27
Figura 4.3. Mapa del viento a 10 metros de altura en África	28
Figura 4.4. Anemómetro de cazoletas y veleta	29
Figura 4.5. Torre anemométrica	29
Figura 4.6. Función de Weibull	31
Figura 4.7. Función de Weibull ejemplo	31
Figura 5.1. Localización de Sinendé, Benin	35
Figura 5.2. Media de horas sol pico diarios, cada mes en Sinendé, Benin	36
Figura 5.3. Perfil de velocidades media de viento en Sinendé, Benin	37
Figura 5.4. Perfil de consumo diario, día tipo en Sinendé, Benin.	38
Figura 5.5. Perfil de consumo cubierto por meses en Sinendé, Benin	38
Figura 5.6. Perfil de energía generada por los aerogeneradores, a lo largo de un día tipo en Sinendé, Benin.	39
Figura 5.7. Perfil diario de generación-consumo de un día tipo de noviembre en Sinendé, Benin.	40
Figura 5.8. Localización de Tanaff, Senegal	41
Figura 5.9. Media de horas sol pico diarios, cada mes en Tanaff, Senegal	42
Figura 5.10. Perfil de velocidades media de viento en Tanaff, Senegal	42
Figura 5.11. Perfil de consumo diario, día tipo en Tanaff, Senegal	43
Figura 5.12. Perfil de consumo cubierto por meses en Tanaff, Senegal	44

Figura 5.13. Perfil de energía generada por los aerogeneradores, a lo largo de un día tipo en Tanaff, Senegal.	45
Figura 5.14. Perfil diario de generación-consumo de un día tipo de noviembre en Tanaff, Senegal.	46
Figura 5.15. Localización de Kouba Olanga, Chad	47
Figura 5.16. Media de horas sol pico diarios, cada mes en Kouba Olanga, Chad.	48
Figura 5.17. Perfil de velocidades media de viento en Kouba Olanga, Chad.	48
Figura 5.18. Perfil de consumo diario, día tipo en Kouba Olanga, Chad	49
Figura 5.19. Perfil de consumo cubierto por meses en Kouba Olanga, Chad	50
Figura 5.20. Perfil de energía generada por los aerogeneradores, a lo largo de un día tipo en Kouba Olanga, Chad.	51
Figura 5.21. Perfil diario de generación-consumo de un día tipo de noviembre en Kouba Olanga, Chad.	51
Figura A.1. Objetivo 3: Salud y bienestar	54
Figura A.2. Objetivo 4: Educación de calidad	54
Figura A.3. Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento	54
Figura A.4. Objetivo 7: Energía asequible no contaminante	55
Figura A.5. Objetivo 12: Producción y consumo responsable	55
Figura B.1. Estructura de las hojas de cálculo del Modelo	57
Figura B.2. Hojas para entrada de datos	58
Figura B.3. Hojas de resultados	58
Figura B.4. Gráfico que muestra la probabilidad de viento junto con la potencia del aerogenerador seleccionado. Ubicación: Chad. Aerogenerador: 3.5kW . . .	61

Índice de tablas

Tabla 1.1. Acceso a la electricidad en una selección de países subsaharianos [BM21] . . .	3
Tabla 1.2. Costes de extensión de red en una selección de países (US\$/km)	4
Tabla 3.1. Tabla comparativa entre los distintos modelos de paneles solares	12
Tabla 3.2. Ventajas y desventajas de baterías ion-litio. Fuente: [Sec14]	16
Tabla 4.1. Formas de medir la energía irradiada. Fuente: [SES15]	26
Tabla 5.1. Datos emplazamiento Benin.	36
Tabla 5.2. Tabla resumen de consumo diario en Sinendé, Benin.	37
Tabla 5.3. Tabla resumen sistema híbrido Sinendé, Benin.	38
Tabla 5.4. Datos emplazamiento Tanaff, Senegal.	41
Tabla 5.5. Tabla resumen de consumo diario en Tanaff, Senegal.	43
Tabla 5.6. Tabla resumen sistema híbrido Tanaff, Senegal.	44
Tabla 5.7. Datos emplazamiento Chad	47
Tabla 5.8. Tabla resumen de consumo diario en Kouba Olanga, Chad.	49
Tabla 5.9. Tabla resumen sistema híbrido Kouba Olanga, Chad.	49
TablaA.1. ODS relacionados con este proyecto	53
TablaC.1. Curva de potencia de aerogeneradores de pequeña potencia.	63

Resumen

Se necesita urgentemente una revolución de la energía limpia para ganar la lucha contra la pobreza energética. La energía limpia proporciona un hilo conductor para cumplir la promesa de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 y el Acuerdo de París. Puede desbloquear el crecimiento económico sostenible, mejorar la salud y el bienestar de los seres humanos y permitir a las mujeres y los niños llevar una vida más productiva. Más allá de los beneficios económicos y sociales directos, el acceso a la energía no contaminante aumentará la seguridad humana y creará capacidad de recuperación en los Estados y las comunidades para ayudar a limitar el riesgo de migración en gran escala en los distintos países en desarrollo.

Actualmente existen 3 enfoques técnicos básicos para llevar la electricidad a zonas remotas:

- Ampliar red nacional
- Sistemas de Energía Doméstica
- Minired eléctrica off-grid

El estudio de “Electrificación rural híbrida para pequeñas necesidades: solar y eólica” busca analizar sistemas de generación mediante plantas tipo que sean domiciliarias y autosuficientes (off-grid) para satisfacer pequeñas necesidades de varias viviendas (alumbrado led, conexión de pequeños dispositivos electrónicos y eventualmente algún electrodoméstico como frigoríficos, algún servicio comunitario, escuela, etc.).

Una configuración híbrida combina al menos dos tipos diferentes de tecnologías para la generación de energía y distribuye la electricidad a varios consumidores a través de una red independiente. Un sistema eléctrico híbrido que funcione como una entidad autónoma puede proporcionar casi la misma calidad y servicios que la red nacional.ç

Mediante este estudio se elaborará un análisis de las condiciones climáticas y cantidad de recurso renovable eólico o fotovoltaico que pueden presentarse para valorar la idoneidad y rentabilidad de la energía eólica frente a la fotovoltaica. Para simplificar el estudio, se proporcionará a MMUU con un modelo de cálculo que servirá de herramienta para establecer la viabilidad de la hibridación, dicha herramienta será presentada a lo largo del presente trabajo.

Palabras clave: electrificación, pobreza energética, sistema asilado, autoconsumo, híbrido, recurso eólico, recurso solar.

Abstract

A clean energy revolution is urgently needed to win the fight against energy poverty. Clean energy provides a common thread to deliver on the promise of the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda and the Paris Agreement. It can unlock sustainable economic growth, improve human health and well-being, and enable women and children to lead more productive lives. Beyond the direct economic and social benefits, access to clean energy will increase human security and build resilience in states and communities to help limit the risk of large-scale migration in individual developing countries.

There are currently 3 basic technical approaches to bring electricity to remote areas:

- Expand national grid
- Home Energy Systems
- Mini off-grid electricity grid

The study “Hybrid rural electrification for small needs: solar and wind” seeks to analyze generation systems by means of off-grid plants to satisfy small needs of several houses (led lighting, connection of small electronic devices and eventually some household appliances such as refrigerators, some community service, school, etc.).

A hybrid configuration combines at least two different types of technologies for power generation and distributes the electricity to several consumers through an independent grid. A hybrid power system operating as a stand-alone entity can provide almost the same quality and services as the national grid.

Through this study, an analysis of the climatic conditions and the amount of wind or photovoltaic renewable resource that can be presented will be elaborated to assess the suitability and profitability of wind energy versus photovoltaic energy. To simplify the study, MMUU will be provided with a calculation model that will serve as a tool to establish the feasibility of hybridization, which will be presented throughout this work.

Key words: electrification, energy poverty, isolated system, off-grid, self-consumption, hybrid, wind resource, solar resource.

1

Introducción

*Cuando la pobreza energética no es
otra pobreza más*

Este primer capítulo presenta la justificación de esta tesis, así como sus principales objetivos. Además, ofrece al lector una visión general de la situación actual del problema del acceso a la energía, a la vez que se describe la estructura que llevará el documento para facilitar su seguimiento.

1.1. Motivación

Se necesita urgentemente una revolución de la energía limpia para ganar la lucha contra la pobreza energética. La energía limpia proporciona un hilo conductor para cumplir la promesa de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 y el Acuerdo de París. Puede desbloquear el crecimiento económico sostenible, mejorar la salud y el bienestar de los seres humanos y permitir a las mujeres y los niños llevar una vida más productiva [MMU21]. Más allá de los beneficios económicos y sociales directos, el acceso a la energía no contaminante aumentará la seguridad humana y creará capacidad de recuperación en los Estados y las comunidades para ayudar a limitar el riesgo de migración en gran escala en los distintos países en desarrollo.

Este estudio: *Electrificación rural híbrida para pequeñas necesidades: solar y eólica* busca analizar sistemas de generación mediante plantas tipo que sean domiciliarias y autosuficientes (off-grid) para satisfacer pequeñas necesidades de varias viviendas (alumbrado led, conexión de pequeños dispositivos electrónicos y eventualmente algún electrodoméstico como frigoríficos, algún servicio comunitario, escuela, etc.).

1.2. Objetivos

El objeto de este trabajo es hacer un estudio comparativo sobre cómo generar energía eléctrica a partir de energía eólica o energía fotovoltaica, o bien a partir de un sistema mixto

eólico-fotovoltaico, teniendo en cuenta las dificultades de su implantación. En la medida de lo posible, se deberá evitar o reducir el uso de baterías porque en el terreno resultan difíciles de reponer.

A este respecto, con el estado de la técnica actual resulta inviable, a priori, no considerar la utilización de baterías (son necesarias para formar la onda de la red), salvo para el caso que la energía eléctrica se vaya a utilizar para el bombeo de agua en pozos poco profundos o para pequeños sistemas de riego. En ese caso las plantas de bombeo solar directo o bombeo eólico directo resultan una alternativa a considerar en función del caudal de agua y altura de elevación (que puede encontrarse hasta 150 m de profundidad) y siempre teniendo en cuenta la cantidad de recurso eólico presente en el emplazamiento.

No obstante, para las plantas tipo domiciliarias se tendrá en cuenta el posible impacto beneficioso en reducción de la cantidad de baterías necesarias por la adición de mini generadores eólicos en el sistema, que pueden proporcionar energía por la noche o en días nublado donde no existe radiación solar suficiente.

El estudio no debe centrarse a un área geográfica específica del planeta (p.ej. África subsahariana, u otras) ya que la necesidad se produce en áreas geográficas diversas y de condiciones climáticas diferentes. Por tanto, el estudio de la solución eólica, frente a la alternativa fotovoltaica, o solución mixta, debe analizarse, no en función del área geográfica, sino de las distintas condiciones climáticas y cantidad de recurso eólico y fotovoltaico que puedan presentarse en el lugar (niveles de irradiación solar kWh/m², producción de energía solar específica media kW/kWp x año, horas de viento, intensidad media del viento, etc.).

Mediante este estudio se elaborará un análisis de las condiciones climáticas y cantidad de recurso renovable eólico o fotovoltaico que pueden presentarse para valorar la idoneidad y rentabilidad de la energía eólica frente a la fotovoltaica.

Esta investigación facilitará a la ONG Manos Unidas la identificación de los casos donde resulte más conveniente cada alternativa cuando la organización estudie llevar a cabo un proyecto de acceso a la energía en alguno de las zonas analizadas. Para simplificar el estudio, se proporcionará a MMUU con un modelo de cálculo que servirá de herramienta para establecer la viabilidad de la hibridación, dicha herramienta será presentada a lo largo del presente trabajo.

1.3. Situación actual

El acceso fiable a la electricidad es una condición previa básica para mejorar la vida de la población en las zonas rurales, para mejorar de la salud y la educación, y para el crecimiento de las economías locales. En la actualidad, más de 1.500 millones de personas en todo el mundo no tienen acceso a la electricidad en sus hogares [EFE18]. Se calcula que el 80 % de estas personas viven en zonas rurales; la mayoría tiene escasas perspectivas de acceder a la electricidad en un futuro próximo. Para 2030, según las proyecciones de la Agencia Internacional de la Energía, no es probable que el número de personas sin electricidad disminuya debido al crecimiento de la población. (véase la Tabla 1.1)

Hay tres enfoques técnicos básicos para llevar la electricidad a las zonas remotas:

Una **primera opción** es simplemente ampliar la red nacional. En muchos países, sin embargo, la ampliación de la red nacional puede llevar a un coste extremadamente alto (véase la Tabla 1.2). Las zonas rurales suelen estar alejadas de la red nacional, por lo que el elevado

	2006		2030	
	Población sin acceso (millones)	% de la población	Población sin acceso (millones)	% de la población
Angola	12,9	88	18	59
Camerún	14,2	78	17	64
Chad	10,1	97	18	92
Congo	2,9	78	4	68
Costa de Marfil	11,6	61	14	50
Guinea Ecuatorial	0,4	73	0,4	50
Gabón	0,9	70	1,2	66
Mozambique	18,6	89	22	72
Nigeria	76,6	53	66	29
Sudán	26,9	71	30	51

Tabla 1.1. Acceso a la electricidad en una selección de países subsaharianos [BM21]

coste de la ampliación de las líneas de transmisión suele hacer inviables estos proyectos. El terreno también aumenta los costes de ampliación de forma significativa. Las zonas montañosas de difícil acceso para la maquinaria requieren más tiempo y recursos para instalar las líneas de transmisión. El tercer factor, el tamaño de la demanda, determina el coste por kWh de ampliación de la red. Es necesaria una potencia mínima de demanda para que un proyecto sea viable. Las zonas rurales suelen ser pequeñas tamaño y su uso de la energía es limitado. En los casos en los que no hay ningún acceso a la electricidad, la potencial demanda debe calcularse con precisión. Aunque los precios de la ampliación de la red difieren de un país a otro, en muchos de ellos la extensión a un pueblo aislado sólo es viable a cierta distancia y siempre que el pueblo tenga una demanda lo suficientemente grande como para alcanzar una potencia mínima necesaria. En caso contrario, la electrificación off-grid es la opción más rentable. La conexión a la red nacional tiene algunas ventajas bien conocidas (como la fiabilidad, los costes más bajos, las economías de escala) en comparación con los sistemas no conectados a la red; sin embargo, es importante tener en cuenta ciertas cuestiones [Zam20]:

- Las tarifas eléctricas de la red son las mismas para los consumidores rurales conectados a la red que para los usuarios urbanos, mientras que los costes son muy diferentes. Por lo tanto, los costosos proyectos de ampliación de la red aumentan el precio global de la electricidad tanto para los consumidores urbanos como para los rurales.
- La electricidad suministrada por las empresas de servicios públicos en los países en desarrollo a menudo carece de la seguridad del suministro y la calidad de los países desarrollados. Los consumidores pueden tener acceso a la electricidad durante horas limitadas cada día y los apagones o caídas de tensión son habituales. La ampliación de la red aumenta la demanda, pero si no hay, un aumento consecuente de la capacidad de generación de energía y la adición de nuevos consumidores sólo agrava la situación y reduce aún más la calidad del suministro.
- La ampliación de la red suele ser una herramienta política. Por un lado, la ampliación de la red electrifica a más usuarios por unidad monetaria que los programas de electrificación rural off-grid, y mucho más rápido. Por ello, los responsables políticos tienden a realizar una extensión de la red a las zonas situadas en el extrarradio para maximizar su apoyo político, o para suministrar electricidad a las zonas urbanas más activas y organizadas políticamente que las rurales. De hecho, las promesas políticas poco realistas de una

futura conexión a la red nacional son perjudiciales tanto para para los consumidores como para la industria. La gente se verá alentada a esperar la red durante muchos años en lugar de tomar la iniciativa y apoyar las soluciones off-grid; y las empresas pueden temer que su inversión en soluciones off-grid puedan resultar inútiles si la red se amplía como fue prometido. [RG11]

Pais	Mano de obra	Materiales	Total
Blangadesh	\$ 350	\$6.340	\$6.690
Laos	\$1.420	\$7.230	\$8.650
El Salvador	\$2.090	\$6.160	\$8.250
Kenia	\$6.590	\$5.960	\$12.550
Senegal	\$5.150	\$10.810	\$15.960
Mali	\$2.590	\$15.170	\$19.070

Tabla 1.2. Costes de extensión de red en una selección de países (US\$/km)

Una **segunda opción** pasa por el llamado Sistema de Energía Doméstica (EHS por su siglas en inglés). La selección de esta tecnología dependerá principalmente de la dispersión de los hogares (distancias entre casas) y del tipo de carga necesaria. A menudo, un pueblo puede subsistir con su propio sistema de energía (pequeña escala), pero los costes de la red de distribución representan una gran parte del proyecto y de su viabilidad. En cambio, si se trata de una población dispersa, la cobertura de una zona grande conllevará mayores costes de conexión, debido a la mayor longitud de las líneas de distribución. En estos casos, los sistemas autónomos off-grid pueden ser una mejor solución. Los sistemas solares domésticos (SSD), los sistemas pico-centrales hidroeléctricas – menos de 5kW – (SPH) o los sistemas eólicos domésticos (SED) suelen ser la solución para proporcionar acceso a la energía a los hogares aislados. En estos sistemas autónomos, la generación de energía se instala cerca de la carga y no hay costes de transmisión ni de distribución. Sin embargo, el coste total de la energía tiende a ser mayor debido a la falta de economías de escala. Para mantener los precios asequibles, los componentes se reducen al mínimo y las capacidades son reducidas, de unos 100 W en el caso de los SSD o de 200 W en el de los SPH, y sirven principalmente para pequeños aparatos de corriente continua para la iluminación y la comunicación (radios, carga de teléfonos móviles o televisores B/N). A diferencia de los sistemas eólicos domésticos, la mayoría de los sistemas solares domésticos no apoyan las actividades generadoras de ingresos, que permiten a un pueblo crear servicios productivos y puestos de trabajo.

Una **tercera opción** es una minired eléctrica que puede proporcionar generación de electricidad centralizada a nivel local utilizando una red de distribución en toda la aldea. Las minirredes proporcionan capacidad tanto para aparatos domésticos como para negocios locales, teniendo el potencial de convertirse en el enfoque tecnológico más potente para acelerar la electrificación rural. Las minirredes también ofrecen una solución óptima para utilizar recursos energéticos renovables de las zonas locales. Muchos lugares ofrecen excelentes condiciones naturales para el uso de la energía solar fotovoltaica (FV), el viento o la energía hidroeléctrica a pequeña escala.

En los últimos años, las tecnologías de energías renovables (TER) han evolucionado de forma exponencial en términos de precios, eficiencia y fiabilidad. Hoy en día, los cálculos conservadores de los costes del ciclo de vida muestran que las minirredes híbridas alimentadas principalmente por energías renovables con un grupo electrógeno, que suele funcionar con

gasóleo, suelen ser la solución técnica más competitiva. Sin embargo, traducir este gran potencial técnico en casos reales de éxito sobre el terreno ha resultado ser un gran reto. El despliegue de minirredes híbridas implica complejas cuestiones financieras y organizativas complejas. Los cuellos de botella para el éxito sostenible de las minirredes no son las tecnologías, sino la financiación, la gestión, los modelos de negocio, el mantenimiento, las operaciones sostenibles y las condiciones socioeconómicas. Cada comunidad presenta un conjunto de características e intereses que definirán la mejor solución técnica según las condiciones financieras, sociales y medioambientales locales [Loz17].

Este estudio aborda las comunidades rurales para las que las minirredes son la solución más adecuada y subraya las ventajas de utilizar una combinación de tecnologías basadas en energías renovables y almacenamiento en baterías. Se centra en comunidades rurales aisladas de las redes públicas y sin perspectivas de conexión en los próximos 15-20 años; que tienen una determinada demanda de carga y sirven a un grupo concentrado de comunidades de vecinos, escuelas o incluso hospitales pequeños. Se pretende identificar los problemas clave y hacer uso de trabajos previos de Manos Unidas (proyectos off-grid que utilicen energía eólica, solar o hidroeléctrica). Las minirredes híbridas suelen tener una capacidad de hasta 100 KVA, según la Agencia Internacional de la Energía. Los resultados se basan en el análisis de la documentación existente, así como parte de investigaciones originales realizadas por la organización de Manos Unidas (MMUU).

En los últimos años, MMUU han participado en la ejecución de cientos de proyectos en todo el mundo. Las lecciones aprendidas de estos proyectos han ayudado a crear un nuevo enfoque hacia las minirredes. Mientras que el enfoque tradicional se centraba en los aspectos tecnológicos, el nuevo se centra en los usuarios finales, sus necesidades y su participación, el desarrollo de capacidades, los mercados, las políticas, la financiación y la asignación de responsabilidades. Este nuevo enfoque no conduce a ningún plan maestro, sino que ayuda a formular soluciones adaptadas a las condiciones locales y a los marcos nacionales.

2

Sistemas híbridos

Hacia un futuro de cero emisiones

Se estudiará el por qué del empleo de los sistemas híbridos off-grid en zonas rurales.

Una configuración híbrida combina al menos dos tipos diferentes de tecnologías para la generación de energía y distribuye la electricidad a varios consumidores a través de una red independiente. La situación que se quiere estudiar con este proyecto es la hibridación únicamente con recursos renovables (solar y eólica, junto con baterías como método de respaldo), por tanto el empleo de grupos electrógenos queda fuera del alcance de este estudio.

Se trata de evaluar si ésta fuera una solución tecnológica rentable, que proporcione electricidad de alta calidad y fiable para la iluminación, las comunicaciones, el suministro de agua o la fuerza motriz, entre otros servicios, a comunidades rurales en países en desarrollo. Un sistema eléctrico híbrido que funcione como una entidad autónoma puede proporcionar casi la misma calidad y servicios que la red nacional. Además, si fuera necesario en el futuro, es tecnológicamente posible conectar una red off-grid a la red nacional. En los países en los que la red nacional puede proporcionar a los usuarios sólo unas horas de electricidad al día y a menudo sufre de apagones, las comunidades rurales atendidas por una minired híbrida podrían recibir un servicio más fiable que los consumidores urbanos.

2.1. ¿Por qué un sistema híbrido?

La combinación de diferentes tecnologías con distintas fuentes de energía ofrece ventajas competitivas en comparación con el uso de una sola tecnología. La combinación de fuentes de energía renovables con un grupo electrógeno ha demostrado ser la solución menos costosa para las comunidades rurales, ya que los beneficios y las ventajas de cada tecnología se complementan entre sí. Como bien se ha explicado previamente, aunque una solución híbrida renovable + generador sea la más económicamente viable, este estudio se centrará en combinaciones híbridas renovables.

La combinación de varias fuentes renovables simplemente tiene sentido en muchos escenarios. Por ejemplo, una combinación de fuentes de energía puede adaptarse a las fluctuaciones estacionales de los recursos, con colectores solares fotovoltaicos que complementan la energía eólica durante los meses con menos viento, o que se recuperan cuando la generación hidroeléctrica disminuye durante la estación seca [Sol19]. En cuanto a las variaciones energéticas diarias, la energía solar tiene un pico de producción alrededor del mediodía, mientras que las instalaciones eólicas pueden funcionar siempre que sople el viento. Las baterías añaden estabilidad al sistema almacenando la energía para los picos de consumo cuando la producción de las fuentes renovables es insuficiente (es decir, para compensar la falta de energía solar durante las horas nocturnas).

2.2. Diferencias entre los distintos sistemas híbridos

Hay dos factores clave a la hora de evaluar la idoneidad de un sistema: la **estructura de costes del sistema** y la **calidad del servicio** [Sal09]. Los grupos electrógenos y las fuentes de energía renovable (RES por sus siglas en inglés) tienen estructuras de costes muy diferentes. Los grupos electrógenos diesel tienen una inversión de capital inicial muy baja en comparación con los RES. Sin embargo, los costes anuales de funcionamiento son mucho más elevados debido a los altos costes que conllevan el mantenimiento y el funcionamiento (costes de combustibles). En el caso de una hibridación únicamente con RES, a pesar de tener unos altos costes de inversión, los costes de mantenimiento, a lo largo de los años, tienden a cero. Esto les hace competitivos dentro de un mundo dependiente de los combustibles fósiles.

La **calidad del servicio** es el segundo factor. Los grupos electrógenos diésel proporcionan energía según la demanda (suponiendo que haya suficiente combustible), lo que significa que funcionan según las necesidades exactas de la comunidad rural. Las fuentes de energía renovables están sujetas a la variabilidad diaria y estacional, aunque la producción de energía puede predecirse más o menos.

Los sistemas de alimentación que funcionan con energía 100 % renovable deben contar con una batería que almacene la energía para que la electricidad esté disponible incluso cuando las fuentes renovables no lo estén durante cortos periodos de tiempo (de un par de horas a varios días, según la demanda y la capacidad de la batería).

Sin embargo, para ofrecer una calidad de servicio fiable (sin apagones), los sistemas de energía renovable deben tener una mayor capacidad de generación que los sistemas híbridos de combustibles fósiles, para producir un exceso de electricidad que almacenar. Esto puede aumentar el precio de la energía en comparación con un sistema que emplee generadores, y reducir la vida útil de la batería, ya que puede estar sometida a un mayor estrés. Sin un generador de reserva, una desviación sustancial del perfil de carga diario previsto y/o unas condiciones meteorológicas inusuales pueden hacer que el sistema se colapse o que sea necesario un corte de carga.

Los sistemas eléctricos híbridos suelen depender de las energías renovables para generar entre el 75 y el 99 % del suministro total (en algunos casos se ha instalado un grupo electrógeno diésel, pero apenas se utiliza debido al buen rendimiento de las renovables) [RS15]. La gran proporción de energías renovables hace que estos sistemas sean casi independientes y reduce los precios de la energía a largo plazo, y el grupo electrógeno diésel se utiliza como respaldo para ayudar en los periodos de altas cargas o de baja disponibilidad de energía renovable. El

tamaño de la batería de reserva puede ser menor y sufre menos estrés que en un sistema de energía 100 % renovable, lo que prolonga considerablemente la vida útil de la batería y reduce los costes de sustitución.

2.3. Diseño de los sistemas híbridos

Una minired híbrida se compone de tres subsistemas: el de producción, el de distribución y el de demanda. Cada subsistema puede variar mucho en sus componentes y arquitectura en función de la disponibilidad de recursos, los servicios deseados a prestar y las características del usuario.

- **Producción:** Este subsistema incluye los componentes de generación (RESs), almacenamiento (baterías), convertidores (convertidores, rectificadores e inversores para convertir la energía DC en AC) y gestión (sistemas de gestión de la energía). El subsistema de producción determina la capacidad del sistema híbrido para suministrar electricidad y conecta todos los componentes a través de la barra colectora (es decir, el cableado eléctrico que conecta los diferentes componentes entre sí) a la tensión necesaria (CA/CC) para el subsistema de distribución.
- **Distribución:** Este subsistema incluye los equipos de distribución que se encarga de distribuir la electricidad producida a los usuarios. Las cuestiones principales son si se utiliza una red de distribución basada en corriente continua o alterna, y si se construye una red monofásica o trifásica. Esta decisión repercutirá en el coste del proyecto y determinará principalmente los dispositivos que pueden utilizarse.
- **Demanda:** Este subsistema incluye todos los equipos del lado del usuario final del sistema, como los contadores, el cableado interno, la toma de tierra y los dispositivos que utilizarán la electricidad generada por la central eléctrica híbrida.

El diseño de la red afecta directamente a la estructura de costes del proyecto y determina no sólo el precio de la energía producida, sino también la calidad de los servicios prestados a los usuarios. En el próximo capítulo (Capítulo 3) se realizará una descripción más detallada de las tecnologías con las que un sistema eléctrico híbrido se compone.

La fase de evaluación temprana de cualquier diseño exitoso debe integrar un análisis de las *condiciones locales* y de las *necesidades de la comunidad rural*, y maximizar la participación y el apoyo de la comunidad en las consideraciones de diseño. La participación local es una necesidad para reducir las posibilidades de fracaso del proyecto y cualquier imagen negativa de las energías renovables en la región.

Algunos aspectos a tener en mente son:

- La gasolina es cara y difícil de distribuir en las zonas rurales. Una minired 100 % diésel no solo es más cara que las híbridas, sino menos autónoma si no se puede asegurar la disponibilidad de combustible.
- Las minirredes híbridas utilizan los recursos locales disponibles, por lo que es menos probable que no haya energía disponible.
- Los proyectos deben adaptarse a las condiciones locales, en lugar de que la población local se adapte al proyecto. Para tener éxito, los proyectos deben respetar las tradiciones locales y las estructuras de liderazgo locales.

- La implicación y la participación locales son esenciales. Los líderes locales deben participar en la toma de decisiones y deben celebrarse reuniones periódicas con los usuarios finales. La viabilidad a largo plazo del sistema depende de la satisfacción de los usuarios.
- La creación paralela de servicios económicos mejora la sostenibilidad del proyecto a lo largo de su vida útil y garantiza una evolución de dichas comunidades rurales.

3

Marco teórico

El objetivo que tiene este capítulo es poner en contexto al lector sobre las tecnologías de generación de energía verde, y sus componentes, que existen actualmente en el mercado.

3.1. Componentes

3.1.1. Módulos solares fotovoltaicos

Los generadores solares fotovoltaicos (FV) convierten la energía del sol en electricidad a través de sus células solares, que son materiales basados en semiconductores. Estas células solares se reúnen para formar un panel solar. Los paneles pueden instalarse juntos para conseguir la capacidad de salida deseada.

Distinguimos tres tipos de paneles solares, dependiendo de la estructura del silicio y del método de producción:

- Módulos monocristalinos: fácilmente diferenciados por su color negro o azul oscuro. Están compuestos por un único cristal y tienen una mayor eficiencia si lo comparamos con otros módulos de silicio. Por esta razón, los paneles monocristalinos son más adecuados en situaciones donde la superficie es reducida ya que son capaces de producir mayor energía en menos espacio - alrededor de 330 Wp con paneles de 60 células y 450 Wp si el panel es de 72 células. La eficiencia de los módulos monocristalinos es superior al 20 % en la actualidad.



Figura 3.1. Panel monocristalino.

- Módulos policristalinos: fácilmente diferenciados por su color azul claro. Presenta una estructura menos uniforme que los monocristalinos, resultando en eficiencias más bajas. Los módulos fotovoltaicos policristalinos para aplicaciones en sistemas aislados de autoconsumo, a día de hoy, suelen medir aproximadamente 1m x 1,65m y producir alrededor de 280 Wp, ó 1m x 2m y 330 Wp, dependiendo de si son de 60 ó 72 células respectivamente, que son los modelos más comunes.

A pesar de tener un rendimiento peor que los anteriores, es el modelo que más se emplea en el sector fotovoltaico por tener un método de fabricación más sencillo.

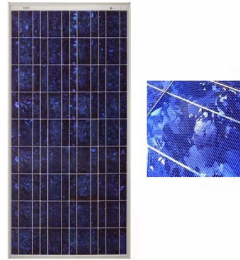


Figura 3.2. Panel policristalino.

- Módulos de capa fina: fácilmente diferenciados por su color marrón o rojo oscuro. Se crea a partir de capas finas de silicio amorfo. Ya que requiere menos material en su producción, resulta en costes más bajos, siendo idónea su utilización en superficies grandes. Presenta el peor rendimiento de los tres modelos.



Figura 3.3. Panel capa fina.

Tipo de panel	Ventajas	Desventajas
Monocristalinos	Alta eficiencia (>20 %)	Alto coste
Policristalino	Bajo coste	Menor eficiencia (14%)
Capa fina	Portatíl, flexible y ligero	Peor eficiencia (8%)

Tabla 3.1. Tabla comparativa entre los distintos modelos de paneles solares

La cantidad de energía solar que se recibe en un lugar concreto se denomina insolación, y este factor determina la producción del generador fotovoltaico. Los recursos solares están disponibles de forma universal en cualquier lugar, con valores más altos cerca del Ecuador. Por lo tanto, los sistemas fotovoltaicos suelen tener un mayor rendimiento en la mayoría de los países en desarrollo que en Norteamérica o Europa. En Norteamérica, la insolación varía entre 1.400 y 2.300 kWh/m², mientras que en Tanzania los valores se sitúan en el rango de los 2.500 kWh/m² y en Afganistán en torno a los 2.000 kWh/m². Aunque el rendimiento depende del lugar, por regla general 1 kWp instalado producirá más de 4 kWh al día.

Las estaciones influyen en la generación fotovoltaica. Durante los meses más cálidos la insolación es mayor que en los meses fríos. Del mismo modo, la insolación es mayor durante

la estación seca que durante la estación lluviosa. En este escenario, la menor producción fotovoltaica durante la estación de lluvias puede compensarse con un pequeño sistema hidráulico que funcionará a niveles más altos debido a la mayor disponibilidad de recursos en los meses lluviosos y en los fríos.

Por supuesto, la hora del día también influye en el perfil de producción, con un pico de producción al mediodía cuando el sol está perpendicular a la superficie de la Tierra, y ninguna producción durante las noches. La estrategia normal es equilibrar las horas que el sistema fotovoltaico está fuera de línea con el exceso de energía producida durante el día y almacenada en una batería o emplear sistemas eólicos durante las horas de no sol.

Los generadores fotovoltaicos producen energía en corriente continua (CC), por lo que son necesarios componentes adicionales para adaptar la tensión a las aplicaciones requeridas (muchas cargas y la mayoría de las redes). Si el sistema incluye baterías, normalmente el generador fotovoltaico se conectará a las baterías a través de un regulador de carga. Si, en cambio, el generador fotovoltaico está conectado a un alimentador de barras de CA, necesitará un inversor para adaptar la tensión.

Ventajas de emplear solar fotovoltaica:

- Casi todos los lugares del mundo reciben energía solar a diario, lo que hace que la tecnología fotovoltaica sea la primera opción disponible para casi todos los sistemas híbridos. Las pequeñas centrales eólicas o hidroeléctricas son mucho más específicas y se adaptan a menos lugares.
- La insolación es bien conocida en todo el mundo y no varía mucho a nivel local (a menos que haya sombra directa sobre la estructura, lo que siempre debe evitarse). No son necesarios largos periodos de recogida de datos para ubicar un sistema fotovoltaico.
- Los paneles solares fotovoltaicos no producen emisiones ni ruido, ya que un proceso fotoeléctrico genera electricidad.
- Los paneles fotovoltaicos son relativamente fáciles de instalar y pueden ser montados por técnicos locales cualificados con cierta formación. Es necesario elegir la mejor orientación de la estructura de los paneles fotovoltaicos para maximizar la producción de energía con respecto a la carga.

3.1.2. Aerogeneradores de pequeña potencia

Los aerogeneradores convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica. Las minirredes híbridas utilizan pequeñas turbinas eólicas de entre 1kW y 20 kW. También se pueden instalar turbinas más grandes, aunque esto aumentará la complejidad del sistema y requerirá mayores costes de construcción para las cimentaciones y las estaciones de control.

Hay una gran variedad de tecnologías en el mercado de las pequeñas turbinas eólicas; sin embargo, para su instalación en comunidades rurales de países en desarrollo, es importante confiar en tecnologías bien probadas y maduras con altos estándares de calidad para garantizar un rendimiento óptimo durante la vida útil del proyecto [OCU18].

Se suele distinguir entre dos modelos de aerogeneradores distintos:

- **Eje horizontal:** el rotor está orientado en la dirección del viento, siendo este modelo el más común en la actualidad. Dichos aerogeneradores utilizan palas aerodinámicas

montadas en un rotor, que puede colocarse tanto en la dirección incidente del viento (necesario un sistema de orientación) como en la dirección dominante de éste. Suelen ser bipalas o tripalas y funcionan a altas velocidades de punta de pala.

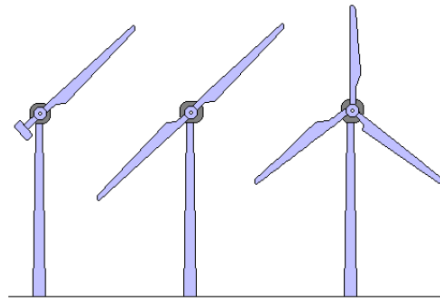


Figura 3.4. Aerogenerador de eje horizontal con una, dos y tres palas.

- **Eje vertical:** el rotor está orientado perpendicular al viento, y gracias a su geometría, estos siempre están orientados en la dirección predominante del viento. En comparación con los de eje horizontal, estos suelen tener una eficiencia menor y un mayor coste.



Figura 3.5. Aerogenerador de eje vertical.

Los modelos de eje horizontal con 2 y 3 palas (como los representados en la Figura 3.5) son los modelos más comunes utilizados en los actuales sistemas de energía híbrida. Para satisfacer la demanda local, a menudo, se instalan varios aerogeneradores pequeños.

Los recursos eólicos son extremadamente específicos del lugar. La topografía y los obstáculos influyen mucho en la velocidad del viento, por lo que las turbinas normalmente se sitúan a lo largo de crestas y colinas a una altura de **al menos 10 metros** para minimizar la influencia que los edificios y los árboles en el perfil del viento. Esta es una consideración importante, dado que las comunidades rurales suelen estar situadas en las partes bajas de las laderas y en los valles. Por esta razón, la recopilación de información sobre los recursos eólicos locales a lo largo del año es necesaria antes de la decisión final sobre la instalación. Normalmente las velocidades del viento en el rango de **4 a 5 m/s** son el mínimo para que un sistema sea rentable. Selección de turbinas especialmente diseñadas para trabajar con vientos de baja velocidad puede ser una buena idea, en función de la información sobre el viento recogida.

La energía eólica también está sujeta a la variabilidad estacional y a la intermitencia diaria. Esto hace que las evaluaciones hora a hora y día a día de la producción prevista sean críticas, y requieran la combinación de la eólica con otras tecnologías. Por ejemplo, las baterías pueden proporcionar un suministro estable de electricidad a la red durante períodos cortos en los que no sopla el viento. Para períodos más largos de vientos bajos puede ser necesario utilizar más

potencia de los grupos electrógenos para satisfacer la demanda de los usuarios. En el caso que atañe este estudio, se intentará compensar aquellos periodos de bajo viento (si son durante el día) con placas solares.

Las pequeñas turbinas de unos pocos kW de capacidad suelen producir energía de corriente continua (CC) a **12 o 24 V** mediante imanes permanentes. En la mayoría de los casos, las turbinas más grandes producen energía de CA a través de la inducción. Dependiendo de la arquitectura del sistema, las turbinas eólicas pueden necesitar un convertidor CA/CC para cargar las baterías directamente; pero si la barra colectora está en CA, la turbina puede conectarse directamente o sólo con un convertidor AC/AC para estabilizar los componentes.

3.1.3. Inversores

Un inversor es un dispositivo eléctrico cuya funcionalidad básica es convertir la fuente de alimentación de corriente continua (CC) en una fuente de alimentación de corriente alterna (CA) convencional.

Encontramos dos momentos en los que se emplean inversores:

- Inversores fotovoltaicos

El inversor fotovoltaico transforma la corriente continua del generador fotovoltaico en corriente alterna apta para la red y la inyecta a la red de corriente alterna. El inversor y los generadores fotovoltaicos deben dimensionarse en función de la potencia escogida.

Este tipo de inversores son *unidireccional* puesto que sólo se necesita transformar la CC de los módulos fotovoltaicos en CA. Este inversor puede emplearse también para transformar la corriente de generadores eólicos e hidráulicos.



Figura 3.6. Inversor SMA Sunny Boy.

- Inversores de baterías

El inversor de batería forma la red aislada como fuente de tensión. El inversor de batería regula el equilibrio entre la energía generada y la energía consumida y está equipado con una gestión de la batería, del generador y de la carga.

Los inversores que se necesitan en este caso son *bidireccionales* ya que además de transformar de corriente continua en alterna, son capaces de realizar la operación inversa ya que es necesario realizar la carga de las baterías.



Figura 3.7. Inversor SMA Sunny Island.

3.1.4. Reguladores

Los reguladores de carga son los encargados de gestionar los sistemas alimentados por acumuladores. Su misión es controlar el flujo de energía entre los generadores eléctricos (solar, eólico, hidráulico...), las baterías y la demanda final. Estos elementos protegen las baterías de sobrecargas y agotamientos, maximizando así su vida útil. Por otro lado, también proporciona una serie de datos que indican su rendimiento, a la vez que realizan controles de seguridad. En los momentos en los que las baterías no se encuentran totalmente cargadas, el regulador se encarga de suministrarle el máximo flujo eléctrico mientras que cuando éstas estén ya cargadas, el regulador desconectará automáticamente las baterías del generador.

En el caso de emplear elementos del fabricante SMA, el inversor Sunny Island lleva integrado un regulador, por tanto no sería necesario emplear un regulador extra en el diseño de la instalación.

3.1.5. Baterías

Una batería está formada por una serie de celdas electroquímicas conectadas entre sí para que tengan la tensión necesaria. El tipo de batería más comúnmente utilizada en una red off-grid híbrida es la de plomo-ácido, aunque desde Manos Unidas están empezando a emplear baterías de ion-litio (véase Tabla 3.2).

Actualmente, en los países en vías de desarrollo tienen la costumbre de emplear baterías de coche para pequeños aparatos como la carga de móviles o la iluminación. Sin embargo, este tipo de batería barata de ciclo corto no es recomendable para los sistemas de energía híbridos. Las ventajas de emplear baterías de ion-litio:

Ventajas	Desventajas
Alta densidad de energía	Duración
Poco peso	Alto coste
Trabaja en alta tensión	Número limitado de cargas
Descarga lineal	Mal comportamiento
Baja autodescarga	en frío

Tabla 3.2. Ventajas y desventajas de baterías ion-litio. Fuente: [Sec14]

Las baterías pueden ser un factor importante en el coste de un sistema eléctrico híbrido. La batería se sustituye normalmente cada 6 u 8 años (dependiendo del modelo), pero un funcionamiento y mantenimiento inadecuados pueden reducir drásticamente su vida útil y, por tanto, aumentar los costes. Para mejorar la vida útil de las baterías el sistema debe ser operado y mantenido adecuadamente. Por ejemplo, es importante comprobar los niveles de electrolito cada dos meses y llenar las baterías con agua destilada en lugar de agua normal. El

funcionamiento de la batería también debe comprobarse cuidadosamente: normalmente, una batería nunca debe funcionar por debajo del 50 o el 45 % de su carga nominal.

El objetivo de implantar un sistema de baterías es proporcionar energía cuando las fuentes de energía renovables no están disponibles. La frecuencia de los periodos sin generación renovable, junto con la necesidad de mantener un estado de carga superior al 45 %, ayudará a determinar el tamaño de la capacidad de la batería. Como bien se ha ido explicando a lo largo de este estudio, el hecho de realizar un diseño híbrido se basa en la idea de reducir el empleo de baterías. Esta decisión tendrá, por supuesto, un impacto en los costes totales del sistema. También es un requisito de calidad, dependiendo de la necesidad de la instalación. Por ejemplo, un hospital puede necesitar una mayor seguridad de suministro. Un sistema eólico combinado con paneles fotovoltaicos, reducirá la capacidad que han de tener las baterías. La cuestión de equilibrio entre una mayor capacidad de la batería o el uso combinado de fuentes renovables que puedan estar operando durante más horas del día, es importante y hay que tenerlo presente a lo largo de todo el trabajo.

Las baterías también presenta otros retos. En general, la eliminación inadecuada de las baterías puede tener graves repercusiones en el medio ambiente local, contaminando tanto el agua como el suelo. El funcionamiento y el mantenimiento de la batería pueden ser un reto, y el uso inadecuado es una causa común del fallo o mal funcionamiento del sistema.

La tecnología de almacenamiento se está desarrollando rápidamente, gracias a la investigación y el desarrollo en el sector del transporte. Por ello ya se está empleando la tecnología de iones de litio en países en desarrollo. Sin embargo, hay poca experiencia sobre cómo se comporta esta nueva tecnología, a largo plazo, en las condiciones típicas de las redes off-grid.

El **almacenamiento de agua por bombeo** (bombear agua a un depósito muy localizado y liberarla para crear energía cuando se necesite) se ha probado como alternativa al almacenamiento electroquímico por batería, pero estos sistemas, a pesar de sus ventajas, se utilizan poco, sobre todo porque son específicos del lugar, caros y menos conocidos. Por ello, en caso de querese emplear almacenamiento por bombeo, un estudio exhaustivo de las condiciones del terreno ha de llevarse a cabo. Esta opción no se descarta a la hora de realizar el diseño híbrido de renovables.

3.1.5.1. Diseño del sistema de baterías

Uno de los factores decisivos a la hora de hacer la elección de las baterías es: la capacidad, la tensión y el tipo de batería que se quiere emplear.

Capacidad de la batería

Para comenzar con el diseño de las baterías, se ha de poder determinar la capacidad de la batería necesaria. Los siguientes factores son los que determinan la capacidad:

- Período de autonomía

El período de autonomía es la duración en días durante los cuales el sistema aislado puede abastecer a los equipos consumidores exclusivamente con la batería. En los sistemas aislados con generadores, se espera un periodo de autonomía de 2 días. Veremos si en los sistemas híbridos (sol + viento) este período cambia.

- Consumo de energía al año (E_a)

Este consumo se determinará con el Modelo, donde todos los equipos consumidores se introducirán para realizar la estimación.

- Rendimiento medio de la batería durante la descarga (η_b)

El rendimiento medio de la batería durante la descarga es de aproximadamente 0,9 para sistemas aislados.

Cálculo

La capacidad de la batería se proporciona en kWh o en Ah:

$$\text{Capacidad de la batera [kWh]} = \frac{\text{Periodo de autonomia} * \frac{E_a}{365}}{\eta_b} \quad (3.1)$$

$$\text{Capacidad de la batera [Ah]} = \text{Capacidad de la batera [kWh]} * \frac{1000}{\text{Tension nominal bateria}} \quad (3.2)$$

La tensión nominal con la que trabajan los inversores Sunny Island (Figura 3.7) es de **48V**, por tanto esta será con la que trabajen las baterías.

Aspectos a considerar:

1. **Capacidad de la batería utilizable**

A la hora de aprovechar al máximo la batería y que tenga una vida útil larga, se debe emplear solo el rango utilizable de la batería para cargas y descargas. En el caso de baterías de plomo, el rango utilizable está alrededor del 50 % de la capacidad nominal, sin embargo las de ion-litio están en el 80 % (consultar siempre documentación del fabricante). Si el fabricante de baterías especifica una profundidad de descarga del 100 %, es recomendable hacer el cálculo solo con 90 % para encontrarnos en el lado de la seguridad.

2. **Medidas estándar**

Los fabricantes de baterías ofrecen tamaños estandar por ello, una vez calculada la capacidad de la batería, se deberá elegir el tamaño estándar justo superior.

3. **Capacidad de la batería mínima**

Baterías de plomo: 100Ah por kWp instalado.

Baterías de ion-litio: 50Ah por kWp instalado.

3.2. Tipo de sistemas aislados

Los sistemas aislados de generación de energía eléctrica autosuficientes pueden clasificarse en tres grandes tipos de sistemas aislados (off-grid), según su sistema de acoplamiento:

- Sistemas aislados con acoplamiento en CA
- Sistemas aislados con acoplamiento en CC
- Sistemas aislados mixtos con acoplamiento en CA y CC

La selección del acoplamiento depende de las tecnologías utilizadas en el sistema y de la estrategia de gestión de la energía. Mientras que la energía fotovoltaica y las baterías funcionan

con corriente continua (CC), las tecnologías electromecánicas, como los grupos electrógenos, la energía eólica de pequeña potencia y la energía hidráulica de pequeña potencia, suelen producir corriente alterna (CA).

3.2.1. Sistemas aislados con acoplamiento en CA

Es el sistema más extendido. En el acoplamiento de corriente alterna (CA), todos los equipos consumidores y las fuentes de energía están acoplados en una red de corriente alterna. Esto tiene la ventaja de que el sistema aislado puede crearse y ampliarse de forma flexible y modular añadiendo componentes estandarizados. De este modo, se adaptan a una demanda creciente de energía.

Estos sistemas son idóneos para su uso en áreas rurales de países en desarrollo y países recientemente industrializados, pero también en zonas de países industrializados en las que no haya disponible red pública. El inversor de batería conectado al banco de baterías crea la red de corriente alterna (forma de onda y frecuencia).

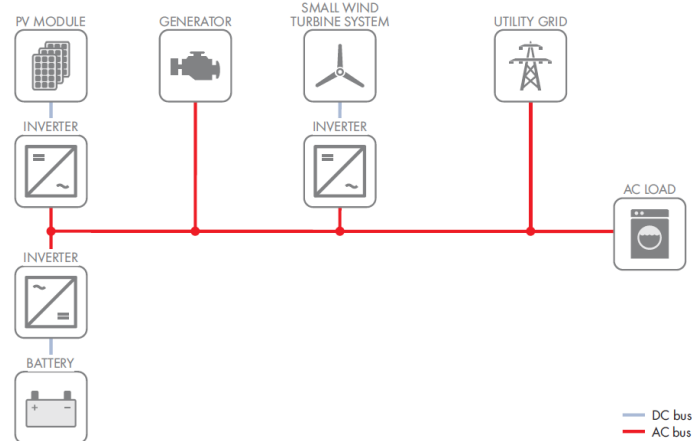


Figura 3.8. Ejemplo de un sistema con acoplamiento en CA.

3.2.2. Sistemas aislados con acoplamiento en CC

El generador fotovoltaico se conecta a través de reguladores de carga CC/CC especiales. Durante las horas diurnas, la batería almacena la energía suministrada por el generador fotovoltaico y por la noche esta energía está disponible nuevamente. El acoplamiento de CC es adecuado para grupos de sistemas sencillos y es ventajoso si el suministro eléctrico se emplea principalmente para la iluminación. Un ejemplo de aplicación son los sistemas solares domiciliarios en el rango de potencia de unos pocos cientos de vatios.



Figura 3.9. Ejemplo de un sistema con acoplamiento en CC.

3.2.3. Sistemas aislados mixtos con acoplamiento en CA y CC

Los sistemas mixtos con acoplamiento de CA y CC son especialmente adecuados para acoplar equipos consumidores de CA de un rango de potencia medio con fuentes de energía de CC. Al mismo tiempo, en los sistemas mixtos la batería puede cargarse con un generador. Los sistemas mixtos sirven para abastecer consumidores remotos y satisfacen una mayor demanda de energía. Por este motivo, los sistemas mixtos se suelen utilizar en granjas, pequeños comercios, escuelas y fincas agrícolas.

Diseñar sistemas mixtos es claramente más complejo que diseñar sistemas simplemente con acoplamiento de CA puesto que hay que tener en cuenta que la potencia nominal de los inversores se corresponda con la potencia necesaria ya que los inversores serán los que limiten la potencia disponible en el lado de CA.

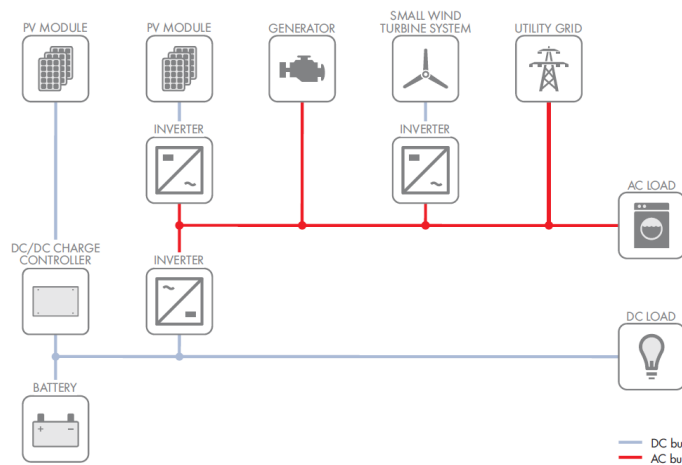


Figura 3.10. Ejemplo de un sistema con acoplamiento en CA y CC.

3.3. Montaje modular de sistemas aislados

Un pueblo en una zona poco habitada no suele salir rentable ampliar la red para abastecer a estas regiones, por ello una alimentación eléctrica autónoma absolutamente independiente de la red eléctrica pública es una opción muy viable montando un suministro de corriente descentralizado que cumpla todas las exigencias necesarias. Este proyecto, en cooperación con MMUU, va a desarrollar un sistema basado en energías renovables que asegura el abastecimiento de regiones aisladas de las redes eléctricas.

El punto central de una de estas redes es el inversor bidireccional de baterías. Con la energía del banco de baterías, este instala una red de corriente alterna, la cual destaca por su flexibilidad y por su gestión inteligente por parte de los suministradores de energía y los consumidores. Este tipo de instalaciones se implantan para el empleo de energía renovables, como por ejemplo el sol. Las plantas de energía solar carecen de componentes móviles, y por lo tanto prácticamente no se desgastan, además son disponibles en todos los tamaños de rendimiento. El inversor fotovoltaico (el elemento central de la planta de generación de energía solar) transforma la corriente continua en corriente alterna conforme con la red.

Las redes de corriente alterna (CA) representan un estándar a nivel mundial, por este motivo no son necesarios conocimientos técnicos especiales, como es el caso de las redes en corriente continua (CC). Los aparatos que trabajan en CA son más asequibles y menos costosos que

los de CC. Un electricista cualificado debe tener los conocimientos técnicos necesarios para la instalación de estas líneas.

Tanto los consumidores como los generadores están conectados a la red de corriente alterna común. El inversor de baterías (en el caso de emplear un Sunny Island) es capaz de funcionar como un regulador mediante mínimas alteraciones en la frecuencia y en la tensión de línea análogo a la red pública a la que se esté conectando. Con todo ello, los excedentes de energía que puedan existir se emplean tanto en abastecer consumidores especiales como la bomba de agua o en cargar los acumuladores. Gracias a un órgano de gestión aislado inteligente, las baterías son relativamente pequeñas y por consecuencia, económicos.

Durante la noche, cuando los consumidores necesitan utilizar elementos que necesita energía (luz, televisión, radio...), el inversor de baterías pone a disposición la energía almacenada durante el día. La red insular cumple de manera perfecta las condiciones para poder adaptarse fácilmente a la creciente demanda de energía. En caso de necesitar una ampliación del sistema, se podrían emplear los Solar Home Systems, que suministran solamente a casas aisladas en CC, sirviendo como proveedor de energía suplementario ayudando a ampliar la red. Cada casa puede ir equipada con una planta PV conectada a red, ayudando a contribuir con la demanda creciente que estas redes pueden experimentar.

Todos los suministradores de corriente funcionan independientemente; si uno de ellos falla, los demás generadores asumen la pérdida de potencia como ocurre en las redes centrales. Si se emplean inversores de baterías en paralelo, se amplía la red de una a tres fases para los casos en los que se necesita un aumento del consumo energético, ya sea por mayor demanda o para abastecer actividades que suponen cargas mayores como, por ejemplo, motores.

La electricidad no es solo para el uso doméstico. Gracias a tener hospitales bien equipados, se evitan transportes de largas distancias. La formación práctica in situ solamente se hace posible de esta manera ya que, gracias a tener energía disponible, se pueden ampliar las ofertas de formación y crear nuevos centros de comunicación.

Existen numerosas fuentes de energía, únicamente hay que saber aprovecharlos. Además de la energía solar, también se pueden acoplar otros inyectores de corriente alterna sin necesidad de ajustes costosos como la energía eólica o la hidráulica (en caso de contar con un recurso hidráulico en las proximidades). De esta forma, al hacer combinación de varias fuente renovables, se podrán emplear acumuladores de menor tamaño y así rebajar los gastos de instalación para todo el sistema.

Para que los centros de abastecimiento continúen recibiendo energía, se podría integrar un grupo electrógeno como reserva de potencia de energía. En el caso que nos concierna, la necesidad de incorporar esta reserva de energía será estudiada y únicamente se considerará cuando se estime que la energía inyectada por las instalaciones renovables (solar y eólica) no cubran la demanda requerida.

Una gestión aislada inteligente en forma modular y ampliable, según las necesidades, con componentes estándar asequibles en todas partes, hacen de estas instalaciones las idóneas en muchas situaciones.

El inversor de baterías es el centro de la planta ya que es el que constituye la red de tensión alterna a la cual están conectados los consumidores, así como los administradores de energía (solar y eólica). En caso de una alta demanda de energía, el sistema es ampliable a tres fases. También se pueden conectar fácilmente más poblaciones. La red insular existente es fácilmente

integrable en la red pública, de este modo se pueden seguir utilizando las inversiones realizadas previamente.

Las líneas de la red de distribución son monofásicas o trifásicas. El uso de la trifásica permite sobre todo la conexión de aparatos de mayor consumo energético que pueden utilizarse para servicios generadores de ingresos, como la carpintería. La existencia de servicios es más común que haya en pueblos más grandes y, por lo tanto, de mayor capacidad. La red trifásica tiene otras ventajas, como la posibilidad de conectar la minired a una red regional o nacional existente (si el voltaje es el mismo). Sin embargo, la red trifásica es más compleja y necesita más líneas conductoras, pero también permite la posibilidad de ampliar el sistema en el futuro.

Por último, es importante recordar que, en caso de ser posible técnicamente, el uso de la red monofásica tiene otras ventajas. Por ejemplo, no es necesario equilibrar las cargas, y para el mismo tamaño hay más capacidad de sobretensión. También reduce los costes y permite ampliar la capacidad de generación en el futuro. Si sólo unos pocos aparatos del pueblo necesitan tres fases, puede merecer la pena invertir en un convertidor de fase en lugar de diseñar un sistema trifásico.

3.3.1. Sistema sencillo monofásico

Este sistema de montaje es la forma más sencilla de formar una red monofásica. El inversor de batería forma la red de CA como fuente de tensión y frecuencia. A dicha red se conectan tanto los consumidores y como los distintos generadores (fotovoltaico, eólico, hidráulico, etc). [SMA20]

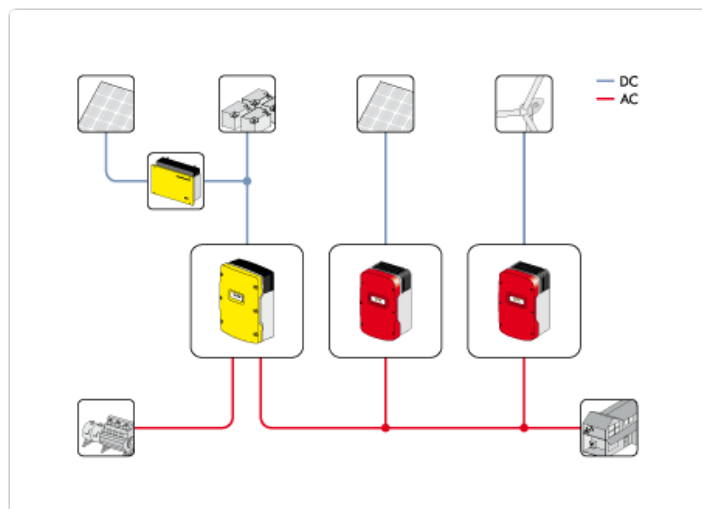


Figura 3.11. Principio de un sistema sencillo monofásico.

Suelen estar especificados este tipo de configuraciones para sistemas desde 1kW a 8kW.

3.3.2. Sistema monofásico de clúster único

En un sistema monofásico de clúster único puede haber hasta tres inversores de baterías conectados a un mismo banco de baterías, que forman un clúster, para aumentar la capacidad del sistema. En el lado de CA los inversores de red, los consumidores y los generadores están conectados al mismo conductor de fase.

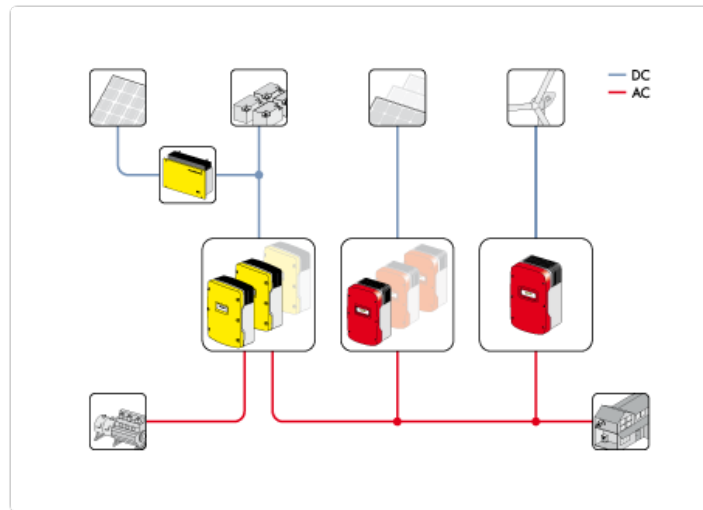


Figura 3.12. Principio de un sistema monofásico de clúster único.

Hasta tres inversores pueden ser acoplados en paralelo sobre una fase para sistemas desde 3kW hasta 24kW.

3.3.3. Sistema trifásico de clúster único

En un sistema trifásico de clúster único puede haber hasta tres Inversores de baterías conectados a una batería, que forman un clúster. En el lado de CA trifásica los Inversores de baterías, así como las fuentes generadora, están conectados a tres conductores de fase distintos.

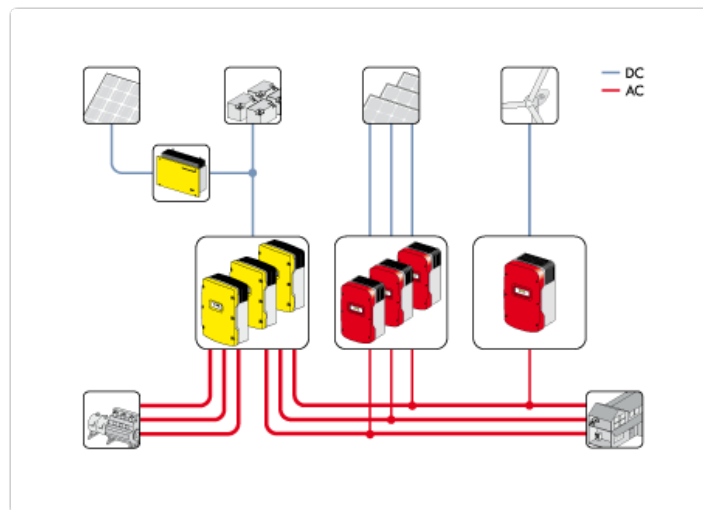


Figura 3.13. Principio de un sistema trifásico de clúster único.

Tres inversores de baterías pueden estar conectados cada uno a una fase para construir un sistema trifásico de 5kW hasta 24kW.

3.3.4. Sistema multiclúster

Los sistemas multiclúster se componen de varios clústeres trifásicos. Cada uno de los clústeres debe estar conectado a una Multicluster-Box. La Multicluster-Box es un componente de la tecnología multiclúster para sistemas aislados, sistemas eléctricos de repuesto y sistemas para la optimización del autoconsumo. Estos sistemas se emplean para demandas altas.

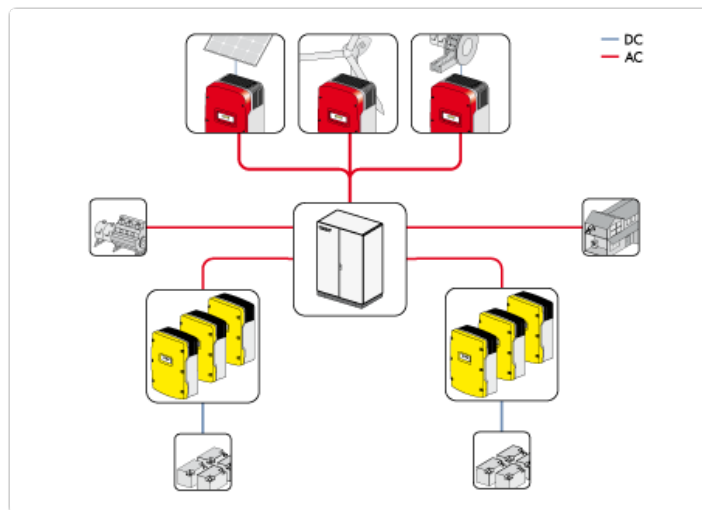


Figura 3.14. Principio de un sistema multiclúster trifásico.

Tres inversores por clúster para construir un sistema de hasta 200kW (hasta 36x Sunny Islands).

4

Recursos energéticos

Este capítulo servirá como introducción de las características generales, tanto del sol como del viento que se emplearán en los sistemas de generación híbridos. Busca presentar una serie de conceptos básicos esenciales para el buen desarrollo del estudio.

4.1. Recurso solar

La energía solar es una energía denominada renovable, ya que procede del sol: fuente inagotable y natural de energía.

La radiación solar es una energía emitida por el Sol, que se propaga en todas direcciones por ondas electromagnéticas. El Sol es capaz de emitir radiación solar desde infrarroja hasta ultravioleta, pero no todas estas alcanzan la superficie terrestre. La irradiancia es lo que expresa la potencia por unidad de superficie que recibe la Tierra.

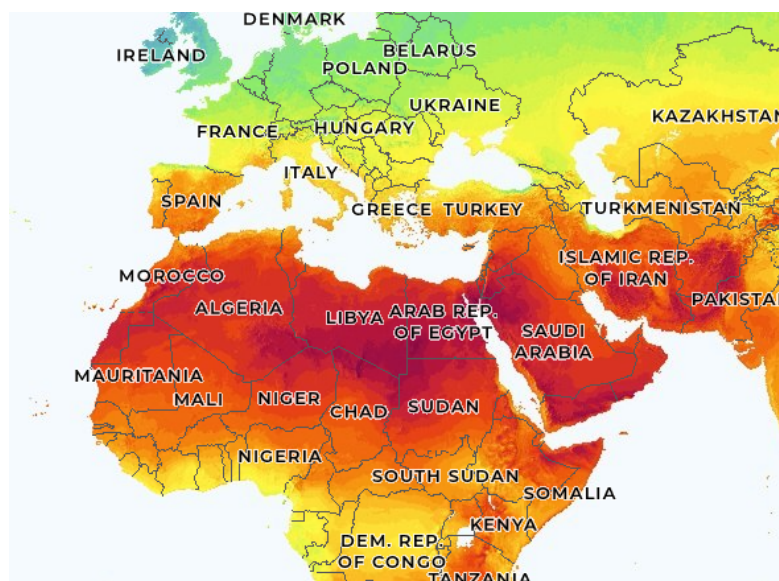


Figura 4.1. Mapa de radiación solar kWh/kWp. Fuente: Global Solar Atlas. [GSA].

En el mapa anterior se muestra un mapa del planeta tierra donde se pueden distinguir por colores las zonas de mayor producción de energía (kWh) por potencia instalada (kWp). Las zonas en rojo presentan un índice más elevado que aquellas con colores más fríos (azul y verde).

Una vez entendido el concepto de radiación solar, a la hora de calcular la capacidad de generar energía, debemos entender los tres tipos de componentes de la radiación: directa, difusa y reflejada.

- **Radiación directa:** aquella que se recibe directamente sin sufrir ninguna alteración en la dirección original.
- **Radiación difusa:** aquella que, al contrario a la directa, sufre cambios de dirección al atravesar la atmósfera terrestre (difusión y reflexión).
- **Radiación reflejada:** aquella que como bien indica su nombre, es la que se refleja en la superficie terrestre.

Por tanto, la radiación total es la suma de las tres mencionadas anteriormente. En la Tabla 4.1 se representan las distintas formas de medir la energía procedente del Sol.

Tipo	Descripción	Unidades
Radiación solar (H)	Energía irradiada sobre un área determinado	Wh/m ² o J/m ²
Irradiancia solar (I)	Energía solar incidente por unidad de tiempo.	
	Potencia solar	W/m ²
Constante solar	Irradiancia que incide perpendicularmente sobre la superficie de la atmósfera terrestre	~ 1,367W/m

Tabla 4.1. Formas de medir la energía irradiada. Fuente: [SES15]

4.1.1. El concepto de hora solar pico - HSP

Las curvas de irradiancia solar con respecto al tiempo varían significativamente en función de la hora del día, la ubicación geográfica y las condiciones climáticas. Por ello se ha creado el concepto de Hora Sol Pico (HSP). Las horas de sol pico indican la energía que incide en horas durante el día/mes/año por unidad de superficie con una radiación solar de 1000 W/m² (3,6 MJ/m² o 1 kWh/m²).

Por ejemplo, si en un emplazamiento en Benin tenemos un promedio de energía recibida de 3425 Wh/m² al día (fuente: Global Solar Atlas), entonces las horas solar pico correspondientes son:

$$\frac{3425Wh/m^2}{1000W/m^2} = 3,43h/dia$$

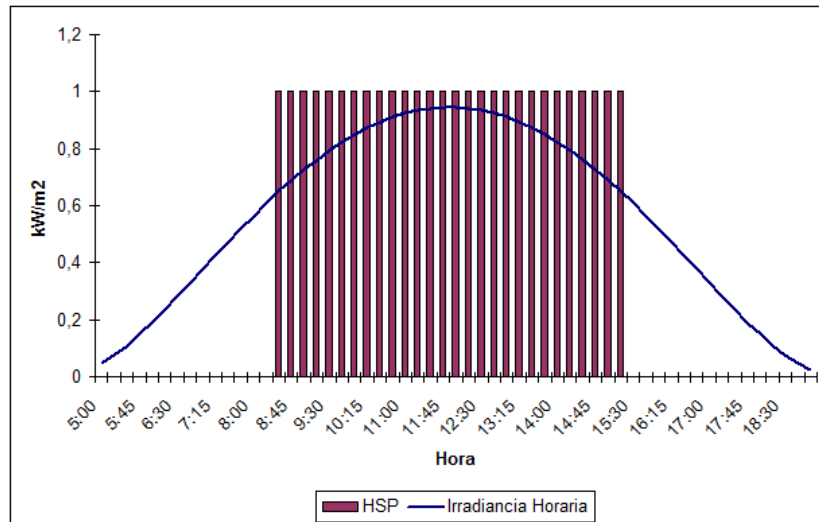


Figura 4.2. Representación de las HSP e irradiación horaria en julio en el hemisferio norte.

Observamos en la Figura 4.2 como evoluciona la irradiación desde las 5h00 hasta las 19h00. El número total de horas en las que ha habido insolación han sido 14 horas, sin embargo, esto es equivalente a decir que ha habido una irradiación constante de $1000\text{W}/\text{m}^2$ durante 7 horas, es decir, 7 HSP al día.

Esta forma de expresar las horas en las que ha habido irradiación solar, es un número hipotético de horas pero es fácil de usar para determinar la energía recibida en un sitio en un determinado tiempo.

Sabiendo que $1\text{HSP} = 1\text{ kWh}/\text{m}^2$, si se tiene un emplazamiento con 900HSP, se sabe rápidamente que la energía recibida en un año es de $900\text{ kWh}/\text{m}^2$.

A la hora de realizar cualquier estudio, los datos solares obtenidos de los emplazamiento serán expresados en HSP al días, mes o año.

4.2. Recurso eólico

Fundamentalmente, los vientos transportan una parte de la energía de las radiaciones solares y soplan en todos los rincones de la superficie terrestre. El calentamiento desigual de la superficie terrestre y las diferencias de presión provocan un movimiento del aire en la atmósfera que crea el viento tal y como lo conocemos.

Tal vez, el primer uso de la energía eólica fue en forma de velas para dirigir los barcos y hay una mención a los ambiciosos planes del gobernante mesopotámico Hammurabi de utilizar molinos de viento para el riego ya en torno al año 1790 a.C.

En los últimos 50-60 años, la generación de electricidad ha crecido en la mayor parte del mundo, siendo el crecimiento más pronunciado el de los países en desarrollo. Por lo tanto, equilibrar el acceso a la energía, el desarrollo económico y la sostenibilidad medioambiental va a ser un reto importante no sólo para las naciones afectadas sino también para la comunidad mundial.

El viento se caracteriza por muy poca predictibilidad, pero utilizando las herramientas adecuadas se puede obtener datos orientativos con los que trabajar.

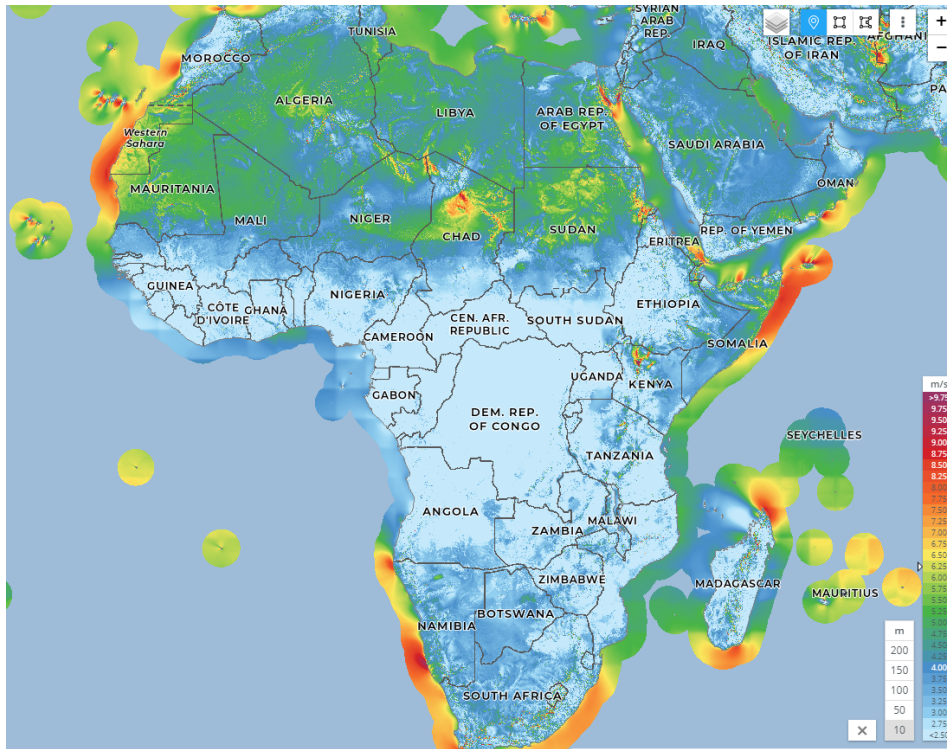


Figura 4.3. Mapa del viento a 10 metros de altura en África. Fuente: Global Wind Atlas [GWA].

La Figura 4.3 representa una imagen extraída de Global Wind Atlas. Esta herramienta permite identificar la velocidad de viento media que existe a distintas alturas, en este caso a 10 metros.

A la derecha de la imagen está la leyenda de colores de velocidades de viento. En rojo las velocidades superiores a 8 m/s y en azul aquellas por debajo de los 4 m/s.

Observamos que el recurso eólico es muy escaso en la zona central del continente, teniendo unos 3 m/s de media. En cambio, en países del Norte de África, y un poco en el sur, se pueden encontrar vientos medios superiores a 5,5 m/s. Estos emplazamientos serían los idóneos para implementar aerogeneradores en la producción de energía puesto que estos necesitan una velocidad entre 4 y 5 m/s para poder comenzar a trabajar.

Teniendo esto en cuenta, a la hora de determinar qué proyectos de Manos Unidas serían viables para la implementación de sistemas híbridos con eólica, habría que considerar si se encuentran en zonas donde la velocidad media de viento supera los 5 m/s.

Países como Nigeria, Zambia, Angola, Benin, Ghana, etc, a simple vista no presentan un recurso eólico fuerte y por tanto no cabría la posibilidad de instalar sistemas con generación eólica.

Una vez se tenga esto en cuenta, y se decida en qué emplazamiento se va a estudiar la posibilidad de instalar generación eólica, se debe realizar un estudio del viento in-situ para poder evaluar de forma más precisa la situación.

4.2.1. Medición del viento

Debido a la aleatoriedad del viento, es necesario obtener medidas más reales de la dirección y sentido del viento. Los instrumentos que se emplean para medir el flujo de aire se denominan

anemómetros, los cuales pueden clasificarse en tres categorías: anemómetros de presión (ej. anemómetro de Dines), anemómetros de rotación (ej. anemómetros de hélices, cazoletas...) y otros (anemómetros laser, de efecto sónico...)

De los instrumentos mencionados anteriormente, los más comúnmente utilizados en el análisis del viento son los anemómetros de rotación de cazoletas. Con el viento incidiendo en la rueda de cazoletas, esta girará a una velocidad de rotación proporcional a la velocidad de viento. Estos anemómetros de rotación suelen complementarse con una veleta de tal forma que también se pueda interpretar la dirección del viento.



Figura 4.4. Anemómetro de cazoletas (izquierda) y veleta (derecha).

■ Ubicación de los anemómetros

Un factor importante a tener en cuenta a la hora de evaluar la velocidad del viento es la rugosidad que presente el emplazamiento de estudio. Por esta razón, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) establece que los sensores de medida empleados deben estar a una altura mínima de 10 metros sobre el nivel del suelo (terreno descubierto). Estos terrenos están definidos por la OMM de la siguiente manera “una superficie donde la distancia entre el anemómetro y cualquier obstáculo debe ser por lo menos de diez veces la altura del obstáculo”.

Toda torre anemométrica ha de tener un equipo de registro donde se guarden los datos obtenidos del viento para su posterior análisis.

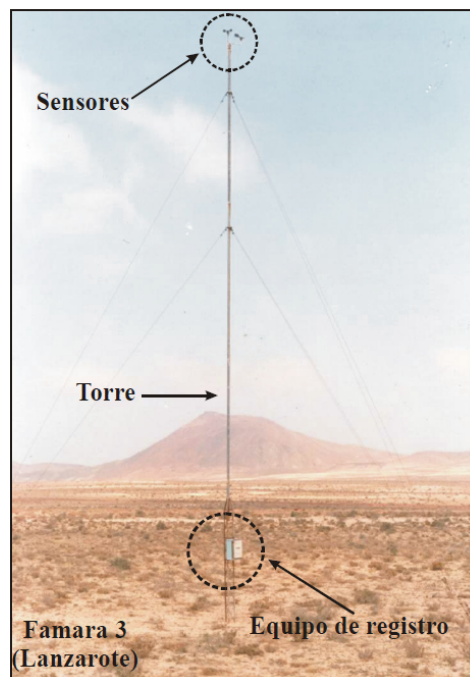


Figura 4.5. Ejemplo de torre anemométrica - Lanzarote.

■ Frecuencia de las medidas

Para determinar cual es la frecuencia óptima de recopilación de datos, debemos conocer el tipo de análisis que se quiere llevar a cabo. Una recomendación en la frecuencia de toma de muestras de viento está entre 5 a 10 segundos con intervalos de 10 minutos a 1 hora.

■ Duración de las medidas

La duración de las medidas depende igual que la frecuencia, de la aplicación que se le quiera dar a los datos.

Existen dos directrices aprobadas:

- a. Medir durante el periodo más largo posible, con la idea de recopilar una gran cantidad de datos para luego ser analizados.
- b. Medir en cada estación del año, ya que los patrones de dirección y velocidad suelen estar relacionados con las estaciones.

■ Unidades de medida de viento

A pesar de existir distintas maneras de registrar las velocidades de viento en función de sus unidades (km/h, nudos, mph, etc.) la manera más común es la de m/s.

La dirección del viento se registra en grados (siendo el Norte 0°).

4.2.2. Distribución de Weibull

Como bien se ha mencionado previamente, el viento depende de muchos factores y es muy complicado establecer cuanto recurso va a haber en un momento determinado. Por ello, para la industria eólica es primordial saber describir la variación de la velocidad del viento. Esta información es necesaria para que el diseño de los aerogeneradores sea óptimo y así minimizar costes. Se requiere una estimación de la posible producción eólica del aerogenerador en un emplazamiento determinado.

Cuando se realiza un estudio de vientos, por norma general se observa que los vientos moderados suelen ser los más comunes que los fuertes vientos huracanados.

La llamada Distribución de Weibull se suele utilizar para describir la variación del viento en un emplazamiento concreto.

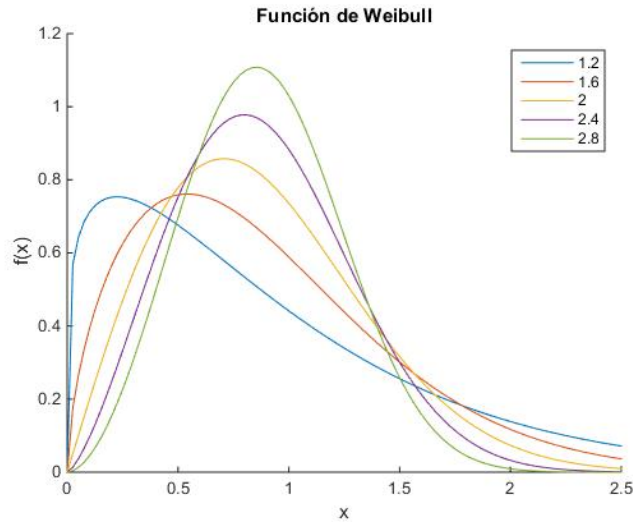


Figura 4.6. Función de Weibull.

En la Figura 4.6, se observan las distintas formas que puede adquirir la función según el factor de forma, K . Este factor de forma variará según el emplazamiento que se esté estudiando. Si el parámetro es $K=2$, la distribución es también conocida como Distribución de Raileigh, la cual es utilizada por muchos fabricantes de aerogeneradores para determinar el rendimiento de sus máquinas.

Como bien se observa, el gráfico muestra una distribución de probabilidad donde el área debajo de la curva siempre vale 1. Esto se debe a que la probabilidad de que siempre esté soplando viento es del 100%.

A continuación se va a explicar cómo se interpreta esta gráfica un pequeño ejemplo. En la Figura 4.7 observamos una distribución donde la media está en 7 m/s y la mediana en 6,6 m/s.

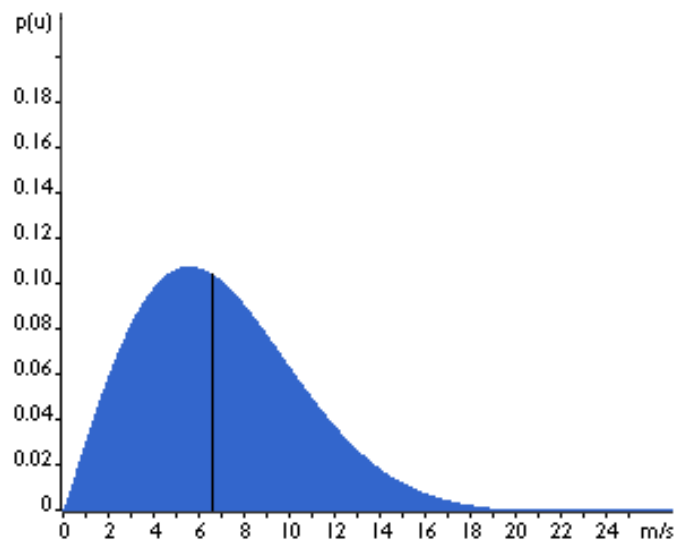


Figura 4.7. Función de Weibull ejemplo.

La mediana nos indica que la mitad del tiempo el viento va a soplar a más de 6,6 m/s y la otra mitad a menos. Mientras que la media es realmente el promedio de las velocidades de viento en dicho emplazamiento.

Por otro lado, observamos que la forma de las curvas no es simétrica, es decir, la distribución de las velocidades de viento es sesgada. Habrá momentos donde encontremos velocidades de viento elevadas, pero con una baja probabilidad. Sin embargo, la velocidad de viento más común es la que se encuentra en el punto más alto de la curva, también conocido como el valor modal de la distribución. En el emplazamiento del ejemplo, será más fácil encontrarse con velocidades de 5,5 m/s.

Una vez entendido el concepto, se va a proceder a la explicación de la herramienta empleada para estos cálculos. Se va a utilizar un modelo desarrollado en Excel, el cual nos va a servir como guía en nuestro estudio. Como bien se lleva mencionando a lo largo de todo este capítulo, el viento ha de estudiarse en el emplazamiento y por tanto los resultados que se obtengan serán orientativos.

El *Modelo de Evaluación de Sistemas Híbridos* (MESH) será explicado con mayor detalle en el “Modelo MESH” pero, a modo informativo, se explicará el funcionamiento desde el punto de vista de la Distribución de Weibull.

Datos de *entrada*:

- **Medias de viento** anuales o mensuales, en m/s.
- **Factor K de Weibull**: si no se conoce se utilizará $K=2$ para sitios interiores, $K=3$ para sitios costeros o $K=4$ para islas.
- **Altitud del emplazamiento**, en metros sobre el nivel del mar.
- **Exponente de cortadura**: se suele asumir como 0.18. Para terreno complejo o alta turbulencia use 0.22. Para terreno muy suave o mar abierta use 0.110.
- **Altura del anemómetro**: la de los datos usados para la velocidad media de viento. Si se desconoce, usar 10m.
- **Altura de la torre**: la nominal determinada por el fabricante.
- **Curva de potencia del aerogenerador**: datos proporcionados por el fabricante.
- **Factor de turbulencia**: es la pérdida derivada de la turbulencia, y de otros factores que puedan influir en la performance. Use 0.00 (0 %) - 0.05 (5 %) en la mayoría de los casos.
- **Margen de seguridad**: Seguridad es la pérdida que tiene en cuenta la energía no-útil (ej.: vientos muy elevados) y añade un margen de seguridad a la hora de satisfacer las necesidades de consumo. Se empleará 0.05 (5 %) para viviendas remotas y electrificación rural con suministro de apoyo. 0.15 (15 %) - 0.25 (25 %) para telecomunicaciones con suministro de apoyo. 0.2 (20 %) - 0.4 (40 %) para cargas de alta prioridad en lugares sin suministro de apoyo (deberían tener componente solar).

Para facilitar la aproximación de las velocidades de viento por la función de Weibull, se realiza la integración por trozos dividiéndose el rango de velocidades de viento en “bins” de 1 m/s de ancho. Para cada bin, se multiplica la potencia eólica instantánea - curva de potencia del aerogenerador - por la probabilidad de esa velocidad de viento de la Weibull.

Este producto (W) es la contribución de la generación eólica para ese bin. El sumatorio de todas estas contribuciones es la generación media de energía del aerogenerador a lo largo de 24 horas.

Resultados:

- **Velocidad media a la altura de buje:** incluye la corrección por cortadura y se usa para calcular la función de probabilidad de Weibull.
- **Factor de densidad del aire:** reducción respecto al nivel del mar.
- **Energía generada media:** media diaria sin el ajuste del margen de seguridad.
- **Energía diaria generada:** incluye todas las pérdidas y es el principal parámetro empleado en la evaluación.
- **Energía anual y mensual generadas:** calculadas a partir del valor diario.
- **Porcentaje de tiempo de utilización:** tiempo que el aerogenerador estará produciendo algo de potencia.

Limitaciones:

Este modelo usa una idealización matemática de la probabilidad de la velocidad de viento. La validez de esta asunción se reduce a medida que el periodo en consideración se reduce (o sea, el periodo para el que se hace la media). Este modelo funciona mejor con medias anuales o mensuales. El uso de este modelo con medias diarias u horarias no se recomienda porque el viento no sigue una distribución de Weibull para periodos cortos.

4.2.3. Aerogeneradores - curva de potencia

Los aerogeneradores que se emplearán en este tipo de instalaciones son los de pequeña potencia. Estos se caracterizan por requerir poca altura (entre 10 y 20 metro) y una gran inercia, lo que les hace idóneos para funcionar a bajas velocidades de viento.

En el Apéndice C se han reflejado los aerogeneradores empleados en el Modelo MESH. Estos incluyen las curvas de potencia de los distintos aerogeneradores, junto con la correspondiente altura de torre y el fabricante. Se ha escogido un tipo de aerogenerador por cada potencia, sin embargo, se pueden considerar otros fabricantes, siempre que se tenga una curva de potencia testada fiable.

Estas curvas de potencia han sido obtenidas de informes de prueba de potencia. La curva de potencia del informe de pruebas de un aerogenerador de 4kW - E70PRO ENAIR - se ha incluido, al final del documento, como ejemplo visual de lo que se está comentando. Este informe lo ha llevado a cabo el Centro de desarrollo de energías renovables (CEDER) - Ciemat.

5

Estudio de casos

Este capítulo tiene como objetivo explicar una serie de casos estudiados: Benin, Chad... con la idea de poder desarrollar una metodología robusta a la hora de decidir qué sistema de generación es el óptimo en función del recurso eólico y solar existente en el emplazamiento.

5.1. Sinendé, Borgou, Benin

Benin es una antigua colonia francesa situada en el oeste de África, donde hace frontera al oeste con Togo, al este con Nigeria y al norte con Burkina Faso y Niger. Presenta una forma estirada y alargada con una extensión parecida a Portugal y Galicia juntos (aproximadamente 112.622 km²). La capital es Porto-Novo, la cual está situada en la bahía de Porto-Novo con salida en océano Atlántico, en el conocido Golfo de Guinea.

El idioma oficial es el francés, por haber sido colonia francesa, aunque coexiste con muchas otras lenguas de diferentes etnias, como por ejemplo, el hausa (musulmanes) o el yoruba (regiones fronterizas con Nigeria).

El emplazamiento de estudio está situado en Sinendé, Borgou al norte de Benin. Borgou es un territorio con una superficie de 25 856 km², una población de 724,171 habitantes en 2002 y una densidad de 28 habitantes/km². Sinendé es uno de los 8 municipios que pertenece a Borgou. [ANC19]



Figura 5.1. Localización de Sinendé, Benin.

Datos	
Localización	Sinendé, Borgou, Benin
Coordenadas	10°00'51.0"N, 02°20'13.0"E
Altitud	378 m
Velocidad media de viento	2,26 m/s
Densidad media de potencia	17 W/m ²

Tabla 5.1. Datos emplazamiento Benin.

Se ha hecho selección de este emplazamiento ya que es un proyecto previo de MMUU donde se realizó una instalación de paneles solares. La idea de estudiar la viabilidad de un sistema híbrido es intentar optimizar el sistema que ya existe.

A continuación, se expondrán los perfiles de los recursos solares y eólicos, como el perfil de consumo diario estimado con el que se realizará el estudio. Se debe tener en cuenta que el perfil utilizado se ha obtenido de documentos de MMUU, siendo estos datos reales que reflejan la necesidad de energía diaria en dicha localización.

5.1.1. Recurso solar

A continuación, se presentan las horas medias de sol pico en cada mes del año en Sinendé. Se observa que en los meses centrales existe menos radiacion que en en enero o diciembre. Esto ha de tenerse en cuenta a la hora de estudiar la complementariedad con generacion eólica ya que sería una buena solución que en dichos meses donde existe bajo recurso solar, el viento sirva como solución a la escasez que se pueda producir.

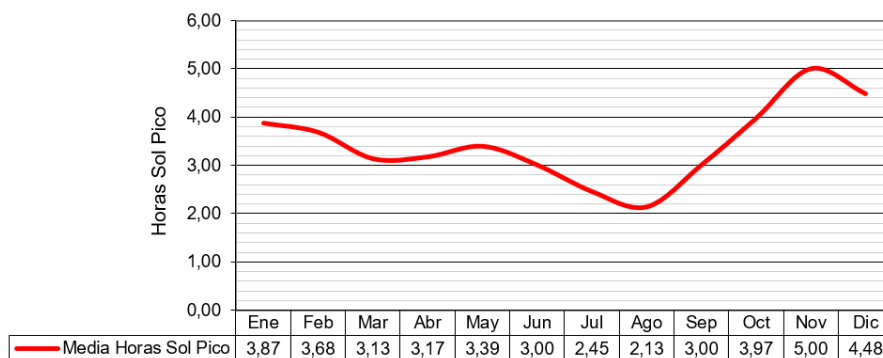


Figura 5.2. Media de horas sol pico diarios, cada mes en Sinendé, Benin. Fuente: Adaptado por LRL de Global Solar Atlas [GSA].

5.1.2. Recurso eólico

En la siguiente tabla se muestran las velocidades medias del viento a 10 metros de altura en cada mes. A simple vista, se ve que el recurso eólico disponible es insuficiente para poder depender de este en la producción de energía eléctrica. Se debe tener en cuenta que los aerogeneradores comienzan a trabajar con velocidades entre 2-3 m/s, dependiendo de la inercia de estos - cuanto más pequeños, mayor inercia y cuanto mayor sea el aerogenerador, mayores velocidades de viento necesitará.

Con esto en mente, se evaluará la posibilidad de implementar un sistema híbrido solar-eólico, en función de las diferentes potencias de los aerogeneradores disponibles.

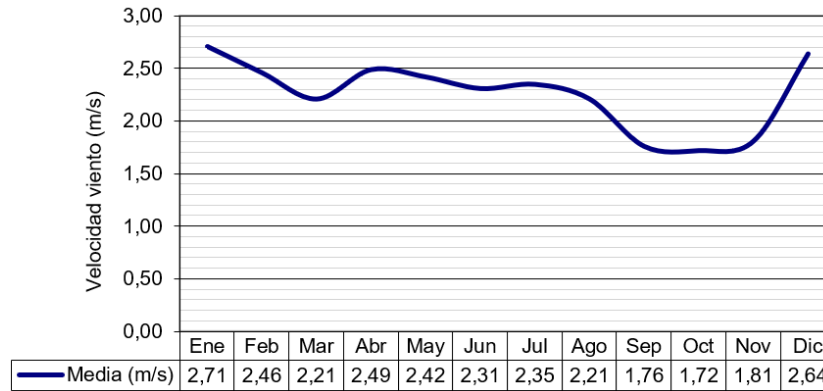


Figura 5.3. Perfil de velocidades media de viento en Sinendé, Benin. Fuente: Adaptado por LRL de Global Wind Atlas [GWA].

A primera vista, parece que el recurso solar y eólico puede que no sean complementarios. Se continuará con el estudio para determinar dicha complementariedad.

5.1.3. Estudio

Demanda de energía diaria (kWh)

A la hora de determinar que perfil de consumo que existe en cada emplazamiento nos hemos apoyado en documentación de MMJU, como mencionado anteriormente. Ver Apéndice E para más información.

Dicha instalación solar abastece 250Wh/día por vivienda, siendo 100 viviendas en el poblado. Por tanto, el consumo total de energía diaria, tal y como se muestra en la Tabla 5.2, es de 25.40 kWh diarios.

	Unidades	Valor
Instalación Tipo A	nº	100
Consumo Diario Total Tipo A	kWh	24.20
Instalación Tipo B	nº	-
Consumo Diario Total Tipo B	kWh	-
Consumo común	kWh	1.20
Total	kWh/día	25.40

Tabla 5.2. Tabla resumen de consumo diario en Sinendé, Benin.

Una vez establecido el consumo total, gracias al Modelo desarrollado, se puede determinar el perfil diario de consumo, durante las 24 horas del día. Se debe tener en cuenta que este perfil es orientativo y muestra un día tipo.

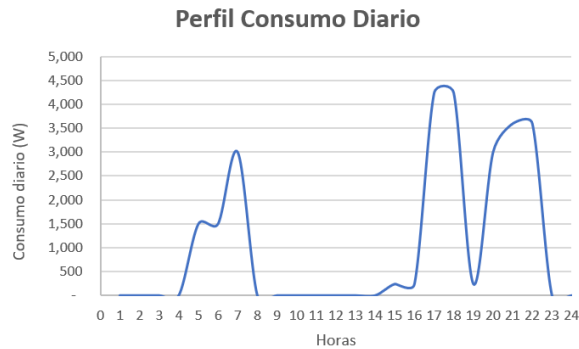


Figura 5.4. Perfil de consumo diario, día tipo en Sinendé, Benin..

Elección de aerogenerador

Como ya se mencionó previamente en la Sección 4.2.3, se han introducido una serie de aerogeneradores tipo. Para esta instalación en concreto se ha seleccionado un aerogenerador de 3.5 kW ya que uno de mayor potencia no podría funcionar en condiciones óptimas debido a la baja velocidad de viento que existe.

En la siguiente tabla resumen se han introducido los valores de los aerogeneradores y paneles seleccionados, dónde se han considerado varios aerogeneradores de la misma potencia, a la vez que el número de paneles solares necesarios para cubrir dicha demanda.

Resultados	
Potencia aerogenerador	3.5 kW
nº aerogeneradores	3
Potencia total instalada	10.5 kW
Potencia panel solar	365 Wp
nº paneles solares	40
Potencia total instalada	14.6 kW

Tabla 5.3. Tabla resumen sistema híbrido Sinendé, Benin.

Este proceso es un proceso iterativo, ya que hay que ir variando el número de aerogeneradores y paneles en función de si se cubre el consumo establecido o no.

En el siguiente gráfico se observa lo que se intenta explicar.

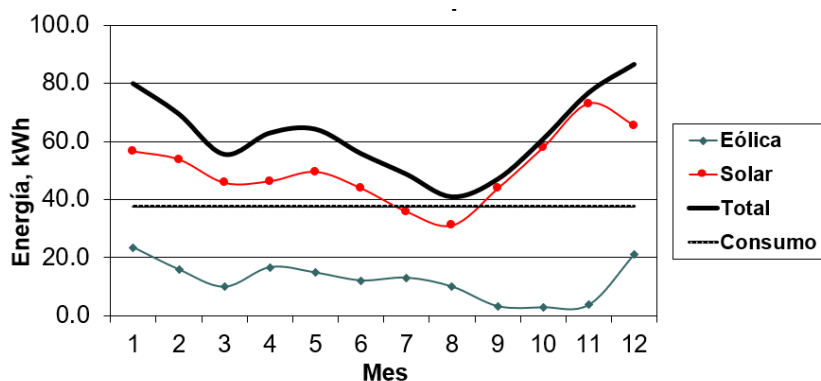


Figura 5.5. Perfil de consumo cubierto por meses en Sinendé, Benin..

Para realizar dicho proceso iterativo, con el gráfico de la Figura 5.5 se puede ir comprobando si dicha potencia va cubriendo o no el consumo establecido previamente.

Perfiles diarios - solar y eólico

Para llevar a cabo un estudio más exhaustivo y preciso, se ha decidido estudiar los perfiles diarios tanto de sol como de viento del emplazamiento, para poder llegar a unas conclusiones para robustas acerca de la solución de hibridación.

Por otro lado, este estudio nos ayudará a conocer en qué momentos del día hubiera déficit de energía y así poder dimensionar las baterías de acorde a las necesidades a cubrir.

Sol

El perfil diario solar no tiene mucho misterio, sabemos que la mayor radiación solar se dará en las horas centrales del día, y por otro lado, gracias al gráfico de la Figura 5.2 sabemos que los meses de mayor radiación serán enero y diciembre. Sin embargo, en el Apéndice D se ha incluido un ejemplo de los perfiles diarios tipo de cada mes.

Viento

El perfil de viento diario es más arbitrario. Se ha realizado un cálculo de la potencia generada por los aerogeneradores instalados (3 x 3.5 kW), y se puede observar en el siguiente gráfico.

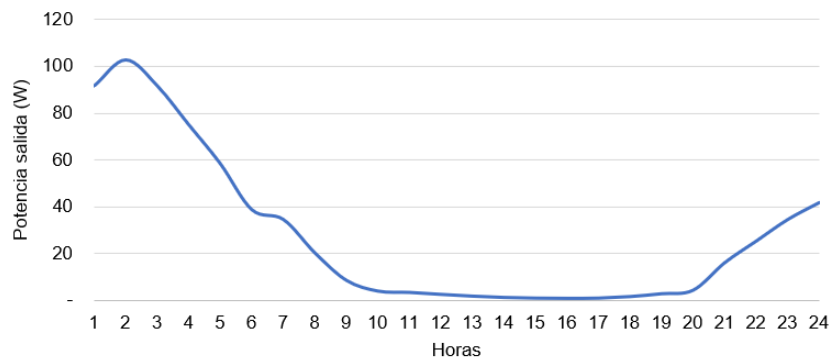


Figura 5.6. Perfil de energía generada por los aerogeneradores, a lo largo de un día tipo en Sinendé, Benin.

Se observa en el gráfico de la Figura 5.6 que en las horas centrales del día apenas existe viento, mientras que en las horas de la noche los aerogeneradores generan gracias al viento.

Una vez ambos perfiles de generación solar y eólica se han determinado, se puede realizar un estudio de complementariedad entre ambas generaciones para poder determinar el déficit de energía que podría haber diariamente y así decidir, con criterio, que tamaño de baterías fuesen necesarias.

Generación - consumo

El estudio de complementariedad en el emplazamiento de Benin da como resultado un déficit de energía máximo de 4.238,25 Wh en el mes de noviembre. Esto se ha calculado teniendo en cuenta el perfil de consumo (-), junto con la generación eólica y solar (+). La generación eólica no aporta una gran diferencia de energía al perfil diario, es la generación solar la que contribuye en su mayoría a cubrir la demanda diaria.

A continuación se muestra el gráfico de noviembre, dónde será necesario un mayor respaldo con las baterías.

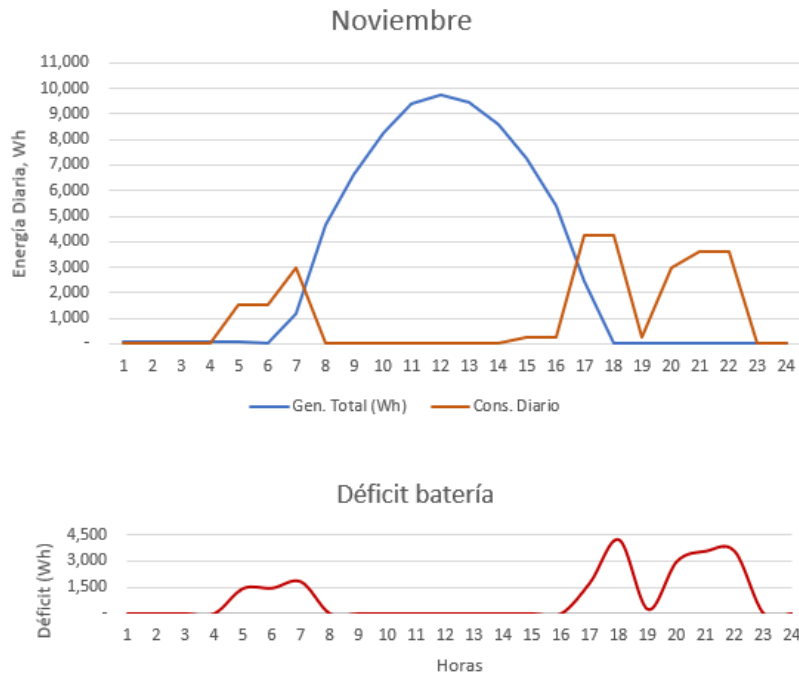


Figura 5.7. Perfil diario de generación-consumo de un día tipo de noviembre en Sinendé, Benin.

Se observa en el gráfico del déficit de la batería, que de 4-8h y de 16-23h es posible que las baterías necesiten trabajar - unas 9 horas diarias.

Notese que estos resultados están calculados a partir de información de Global Wind Atlas y Solar Wind Atlas, donde se especifican días tipo. A la hora de llevar a cabo el estudio real, habrá que introducir datos reales que se hayan medido en el propio emplazamiento.

5.1.4. Conclusiones

Benin es un país con muy escaso recurso eólico, esto queda comprobado por el estudio previo que se ha hecho. Con una velocidad media anual de 2,26 m/s y observando el perfil eólico diario que se muestra en la Figura 5.6, se debe descartar la idea de hibridar la generación solar con eólica ya que se demuestra que en las horas de mayor demanda, el viento es casi inexistente.

Observando el gráfico de la Figura 5.5 podemos concluir que la aportación de energía eólica al mix no es significativa y por tanto, no se ha podido mejorar la instalación solar de 40 paneles de 365 Wp.

Para el caso de Benin se concluye que un sistema híbrido no es la solución.

5.2. Tanaff, Sédhiou Region, Senegal

El emplazamiento está localizado en el sur de Senegal, un país del norte de África occidental que limita con el Océano Atlántico, Mauritania, Mali, Gambia y Guinea. La población nacional es de 16 millones de personas, concentradas principalmente en los alrededores de la capital, Dakar.

El valle de Tanaff es un área de la región de Sédhiou que forma parte del departamento de Goudomp. El nombre procede de la aldea más representativa en términos económicos y demográficos (Tanaff) que tiene en torno a 9.000 habitantes. El valle es fundamentalmente una cuenca fluvial de 480 km² en cuyo interior se insertan 5 municipios, con un total aproximado de 80 000 personas de varias etnias. El valle se caracteriza por un entorno rural con una calidad de vida que está entre las peores de la región, dada la ausencia y la inaccesibilidad de los servicios públicos más importantes.

En dicho emplazamiento habrá una “Casa de la Mujer” que tiene como finalidad albergar encuentros, seminarios, laboratorios y cualquier otra actividad que sirva para reducir cualquier forma de discriminación, reforzar y promover la igualdad de género, concienciando, educando e implicando a todos los agentes sociales. [Sal]

Dicha construcción será llevada a cabo por “Kaira Loro Architecture”, un evento organizado por Balouo Salo, una organización sin ánimo de lucro italiana que busca solventar problemas humanitarios y medioambientales. Lo que se ha intentado buscar con este estudio es poder dar una solución a los problemas de abastecimiento eléctricos, estudiando tanto el recurso solar como eólico para poder cubrir las necesidades de la Casa.



Figura 5.8. Localización de Tanaff, Senegal.

Datos	
Localización	Tanaff, Sédhiou Region, Senegal
Coordenadas	12°39'50.4"N, 15°25'53.1"E
Altitud	11m
Velocidad media de viento	2,99 m/s
Densidad media de potencia	34 W/m ²

Tabla 5.4. Datos emplazamiento Tanaff, Senegal.

5.2.1. Recurso solar

Al igual que en caso anterior, se observa que los meses con mayor radiación solar son los primeros del año y los últimos.

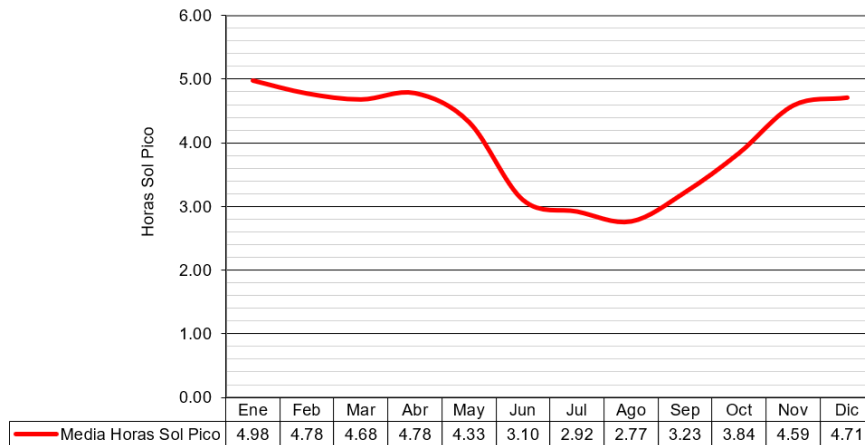


Figura 5.9. Media de horas sol pico diarios, cada mes en Tanaff, Senegal. Fuente: Adaptado por LRL de Global Solar Atlas [GSA].

5.2.2. Recurso eólico

Como mencionado anteriormente, Tanaff se encuentra en una cuenca fluvial, y esto se puede observar por el perfil eólico que se representa más abajo. La velocidad media anual no llega a los 3m/s pero cabe mencionar que en los meses de enero y diciembre, esto asciende hasta casi los 4m/s.

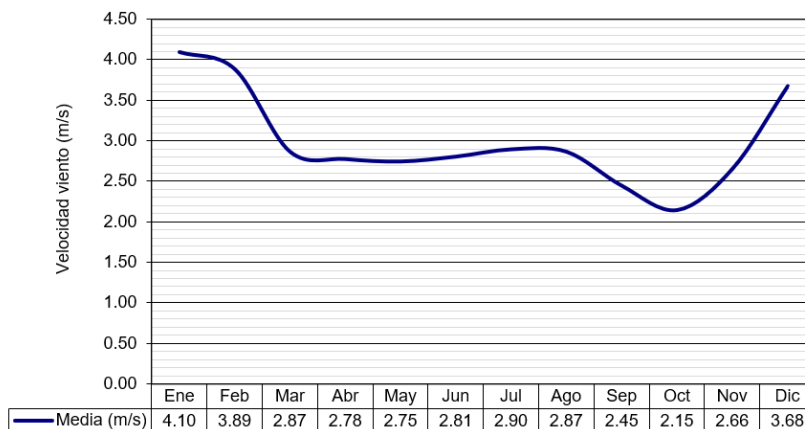


Figura 5.10. Perfil de velocidades media de viento en Tanaff, Senegal. Fuente: Adaptado por LRL de Global Wind Atlas [GWA].

A primera vista, parece que el recurso solar y eólico puede que no sean complementarios. Se realizará un estudio para determinar dicha complementariedad en el siguiente apartado.

5.2.3. Estudio

Demanda de energía diaria (kWh)

La demanda de energía diaria de este emplazamiento ha sido estimada por el uso que se le quiere dar en un futuro. Esta Casa, como bien se ha explicado previamente, quiere albergar a grupos de mujeres con el fin de educarlas y empoderarlas. El perfil se asemeja al de una escuela, donde cada aula dispondrá de bombillas y habrá ordenadores y televisores comunes con los que realizar las actividades diarias.

Dicha casa dispone de una cocina, por tanto un arcón congelador se ha considerado conveniente al igual que ventiladores para sobrellevar las horas centrales del día.

Dicha instalación necesitará abastecer un único edificio que consume 4.85 kWh/día, como se observa en la Tabla 5.5.

	Unidades	Valor
Instalación Tipo A	nº	1
Consumo Diario Total Tipo A	kWh	2.45
Instalación Tipo B	nº	-
Consumo Diario Total Tipo B	kWh	-
Consumo común	kWh	2.40
Total	kWh/día	4.85

Tabla 5.5. Tabla resumen de consumo diario en Tanaff, Senegal.

Cierto es que el consumo esperado en este caso ejemplo es mucho menor que en el de Sinendé, Borgou, Benin ya que únicamente se busca cubrir la demanda de la Casa y no de una aldea o comunidad entera.

Una vez establecido el consumo total, gracias al Modelo desarrollado, se puede determinar el perfil diario de consumo, durante las 24 horas del día. Se debe tener en cuenta que este perfil es orientativo y muestra un día tipo.

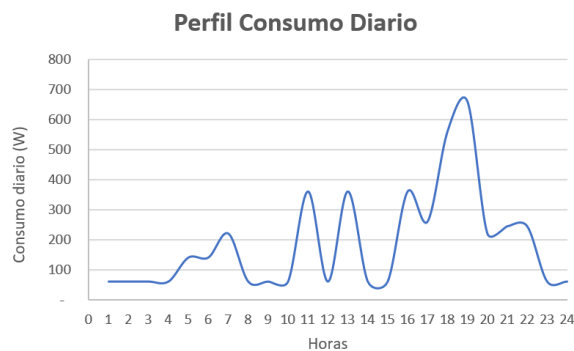


Figura 5.11. Perfil de consumo diario, día tipo en Tanaff, Senegal.

Elección de aerogenerador

Una vez introducidos los aerogeneradores en el Modelo (Sección 4.2.3) se ha seleccionado un aerogenerador de 1.5 kW. La elección de un aerogenerador pequeño es debido a que la demanda es baja y el viento disponible no muy elevado. La elección de un aerogenerador mayor podría conllevar problemas al no tener inercia suficiente para empezar a girar con poco viento.

En la siguiente tabla resumen se han introducido los valores de los aerogeneradores y paneles seleccionados, dónde se han considerado varios aerogeneradores de la misma potencia, a la vez que el número de paneles solares necesarios para cubrir dicha demanda.

Resultados	
Potencia aerogenerador	1.5 kW
nº aerogeneradores	2
Potencia total instalada	3 kW
Potencia panel solar	365 Wp
nº paneles solares	10
Potencia total instalada	3.65 kW

Tabla 5.6. Tabla resumen sistema híbrido Tanaff, Senegal.

Este proceso es un proceso iterativo, ya que hay que ir variando el número de aerogeneradores y paneles en función de si se cubre el consumo establecido o no.

En el siguiente gráfico se observa lo que se intenta explicar.

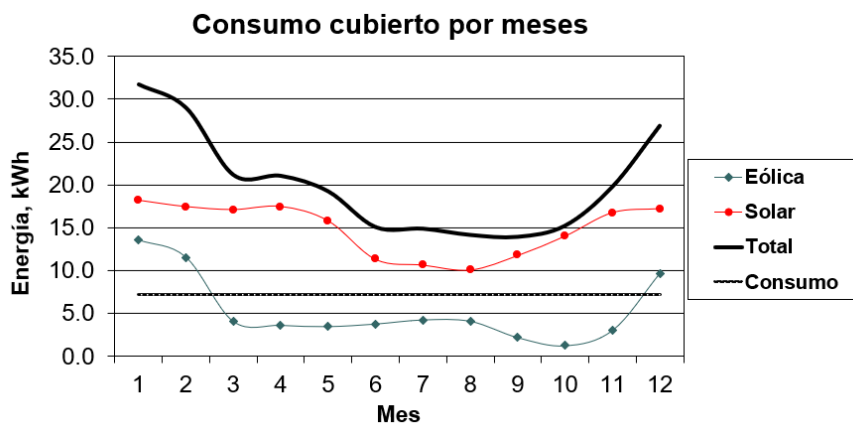


Figura 5.12. Perfil de consumo cubierto por meses en Tanaff, Senegal.

Para realizar dicho proceso iterativo, con el gráfico de la Figura 5.12 se puede ir comprobando si dicha potencia va cubriendo o no el consumo establecido previamente.

En este caso, se observa como la aportación de la energía eólica es escaso comparado con el del recurso solar, pero para la configuración seleccionada, la demanda se cubre.

Perfiles diarios - solar y eólico

Como se describió en el caso anterior, para llevar a cabo un estudio más exhaustivo y preciso, se ha decidido estudiar los perfiles diarios tanto de sol como de viento del emplazamiento, para poder llegar a unas conclusiones para robustas acerca de la solución de hibridación.

Por otro lado, este estudio nos ayudará a conocer en qué momentos del día hubiera déficit de energía y así poder dimensionar las baterías de acorde a las necesidades a cubrir.

Sol

El perfil diario solar no tiene mucho misterio, sabemos que la mayor radiación solar se dará en las horas centrales del día, y por otro lado, gracias al gráfico de la Figura 5.9 sabemos que los meses de mayor radiación serán de diciembre a abril.

Los perfiles solares de cada mes en Senegal son muy parecidos a los de Benin, por eso en el Apéndice D se ha incluido un ejemplo de los perfiles diarios tipo de cada mes del caso de Benin.

Viento

El perfil de viento diario es más arbitrario. Se ha realizado un cálculo de la potencia generada por los aerogeneradores instalados, y se puede observar en el siguiente gráfico.

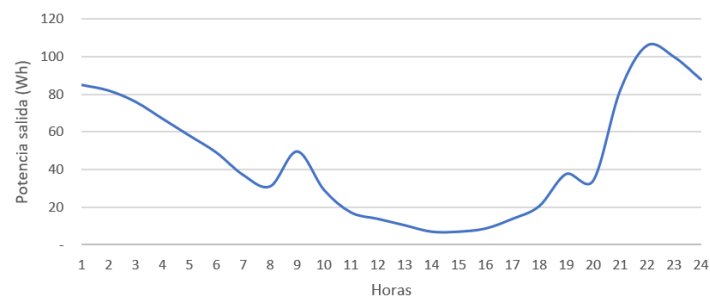


Figura 5.13. Perfil de energía generada por los aerogeneradores, a lo largo de un día tipo en Tanaff, Senegal.

Se observa en el gráfico de la Figura 5.13 que en las horas centrales del día la generación eléctrica es escasa, mientras que en las horas de la noche los aerogeneradores están generando mayores cantidades.

Una vez ambos perfiles de generación solar y eólica se han determinado, se puede realizar un estudio de complementariedad entre ambas generaciones para poder determinar el déficit de energía que podría haber diariamente y así decidir, con criterio, que tamaño de baterías fuesen necesarias.

Generación - consumo

El estudio de complementariedad en el emplazamiento de Senegal da como resultado un déficit de energía máximo de 622.19 Wh. Esto se ha calculado teniendo en cuenta el perfil de consumo (-), junto con la generación eólica y solar (+). La generación eólica no aporta una gran diferencia de energía al perfil diario, es la generación solar la que contribuye en su mayoría a cubrir la demanda diaria.

A continuación se muestra el gráfico de noviembre, donde será necesario un mayor respaldo con las baterías.

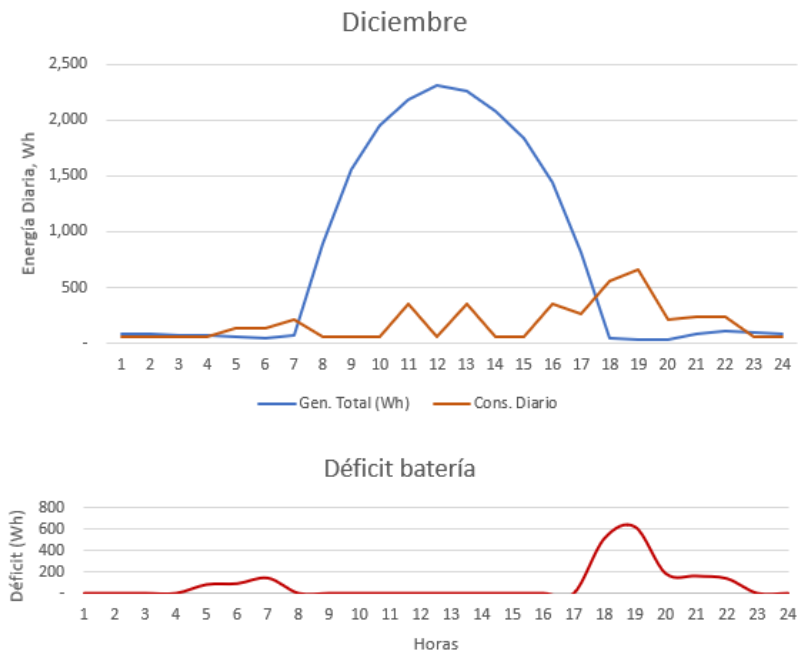


Figura 5.14. Perfil diario de generación-consumo de un día tipo de noviembre en Tanaff, Senegal.

Se observa en el gráfico del déficit de la batería, que de 4-8h y de 17-23h es posible que las baterías necesiten trabajar - unas 7-8 horas diarias.

Notese que estos resultados están calculados a partir de información de Global Wind Atlas y Solar Wind Atlas, donde se especifican días tipo. A la hora de llevar a cabo el estudio real, habrá que introducir datos reales que se hayan medido en el propio emplazamiento.

5.2.4. Conclusiones

El caso de este emplazamiento es especial. Se ha tratado de utilizar un ejemplo real, con necesidades reales, para intentar cubrir la demanda eléctrica. El perfil de consumo es mayoritariamente diario, por tanto las horas de sol con los paneles solares serán claves.

En la “Casa de la mujer” se intentan cubrir necesidades básicas y el estudio nos demuestra que es posible una pequeña hibridación. Lo que cabría mencionar es que los aerogeneradores de 1 y 1,5 kW, en muchos casos, son empleados únicamente para cargar las baterías. Esto es ventajoso para este emplazamiento ya que, debido a las bajas velocidades de viento, se necesitan aerogeneradores de gran inercia, y los de 1 y 1,5 kW son idóneos.

La solución, por tanto, sería un sistema híbrido donde la carga de baterías, aparte del excedente de energía solar generado, vendría del viento. Esto abre la posibilidad de evitar el uso de generadores de diesel, aumentando la capacidad de las baterías para incluir la generación eólica.

5.3. Kouba Olanga, Borkou, Chad

Borkou se encuentra en el desierto del Sáhara, y contiene partes de las montañas Tibesti en el norte. El punto más alto de Chad, Emi Koussi, se encuentra en Borkou. La depresión de Bodélé se encuentra en el centro-sur de la región.

La región limita con Libia al norte, la región de Ennedi-Ouest al este, la región de Wadi Fira, la región de Batha, la región de Bahr el Gazel y la región de Kanem al sur, y la región de Níger y Tibesti al oeste. La frontera norte de la región se encuentra en la Franja de Aouzou, históricamente un punto de disputa entre Chad y Libia. [Wik18]



Figura 5.15. Localización de Kouba Olanga, Chad.

Datos	
Localización	Kouba Olanga, Borkou, Chad
Coordenadas	15°44'56.0"N, 18°17'43.0"E
Altitud	256m
Velocidad media de viento	5,72 m/s
Densidad media de potencia	204 W/m ²

Tabla 5.7. Datos emplazamiento Chad

La selección de este emplazamiento ha sido de forma arbitraria, buscando una zona donde el recurso eólico fuese lo suficientemente elevado como para poder contribuir a la generación híbrida de sol y viento. Como se observa en la Tabla 5.7, la velocidad media de viento ronda casi los 6m/s, mucho más elevada que en los casos anteriores.

A continuación, se expondrán los perfiles de los recursos solares y eólicos, como el perfil de consumo diario estimado con el que se realizará el estudio. EL perfil de consumo utilizado en este caso ha sido el mismo que en el estudio de Benin, ya que se quería mantener una homogeneidad a la hora de poder comparar resultados.

5.3.1. Recurso solar

A continuación, se presentan las horas medias de sol pico en cada mes del año en Borkou. Se observa que la radiación es bastante constante a lo largo de todo el año. En los meses de julio y agosto es donde encontramos unas horas de sol pico más bajas.

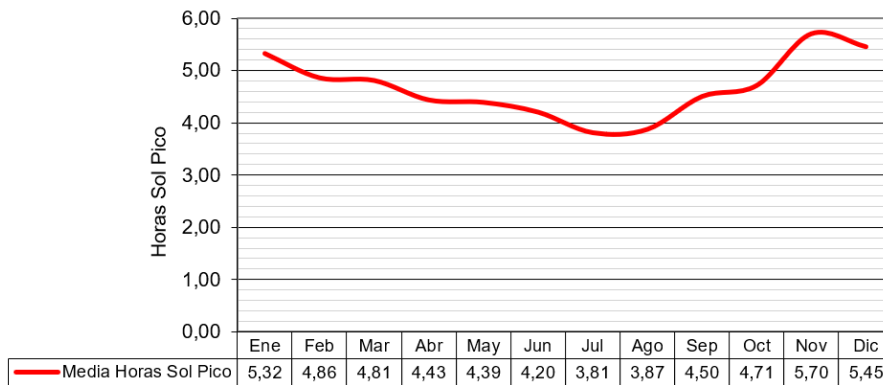


Figura 5.16. Media de horas sol pico diarios, cada mes en Kouba Olanga, Chad. Fuente: Adaptado por LRL de Global Solar Atlas [GSA].

5.3.2. Recurso eólico

En la siguiente tabla se muestran las velocidades medias del viento a 10 metros de altura en cada mes. A diferencia de los casos anteriores, en Kouba Olanga el viento alcanza velocidades hasta de 8.76 m/s en diciembre. Esto es muy buena señal, ya que la generación de energía eólica supondrá una contribución muy importante en la hibridación con solar.

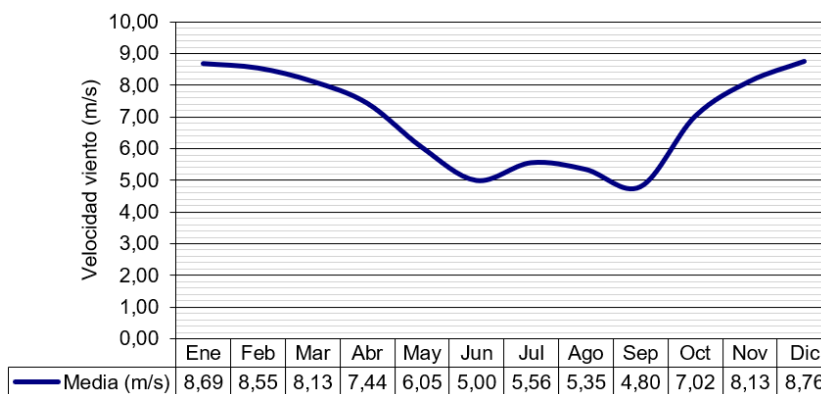


Figura 5.17. Perfil de velocidades media de viento en Kouba Olanga, Chad. Fuente: Adaptado por LRL de Global Wind Atlas [GWA].

Con esto en mente, se evaluará la posibilidad de implementar un sistema híbrido solar-eólico en función de las diferentes potencias de los aerogeneradores disponibles.

5.3.3. Estudio

Demanda de energía diaria (kWh)

Como se ha mencionado previamente, el perfil de consumo se ha asumido igual que en el caso de Benin, por tanto la tabla siguiente muestra el consumo diario de una comunidad de 100 viviendas con 250Wh/día por vivienda.

	Unidades	Valor
Instalación Tipo A	nº	100
Consumo Diario Total Tipo A	kWh	24.20
Instalación Tipo B	nº	-
Consumo Diario Total Tipo B	kWh	-
Consumo común	kWh	1.20
Total	kWh/día	25.40

Tabla 5.8. Tabla resumen de consumo diario en Kouba Olanga, Chad.

Una vez establecido el consumo total, gracias al Modelo desarrollado, se puede determinar el perfil diario de consumo, durante las 24 horas del día. Se debe tener en cuenta que este perfil es orientativo y muestra un día tipo.

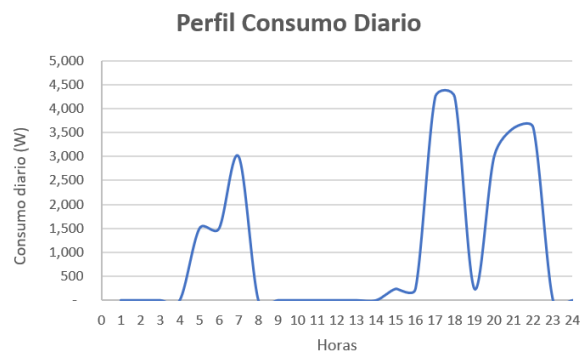


Figura 5.18. Perfil de consumo diario, día tipo en Kouba Olanga, Chad.

Elección de aerogenerador

Para esta instalación en concreto se ha seleccionado un aerogenerador de 3,5 kW. En este escenario, se podría haber considerado uno de mayor potencia, ya que debido a las altas velocidades de viento estos aerogeneradores no tendrían problema en comenzar a girar a pesar de la menor inercia. Sin embargo, se ha optado por introducir 2 aerogeneradores de 3,5 kW en vez de 1 de 4 kW.

En la siguiente tabla resumen se han introducido los valores de los aerogeneradores y paneles seleccionados, dónde se han considerado varios aerogeneradores de la misma potencia, a la vez que el número de paneles solares necesarios para cubrir dicha demanda.

Resultados	
Potencia aerogenerador	3.5 kW
nº aerogeneradores	2
Potencia total instalada	7.00 kW
Potencia panel solar	365 Wp
nº paneles solares	15
Potencia total instalada	5.48 kW

Tabla 5.9. Tabla resumen sistema híbrido Kouba Olanga, Chad.

Este proceso es un proceso iterativo, ya que hay que ir variando el número de aerogeneradores y paneles en función de si se cubre el consumo establecido o no.

En el siguiente gráfico se observa lo que se intenta explicar.

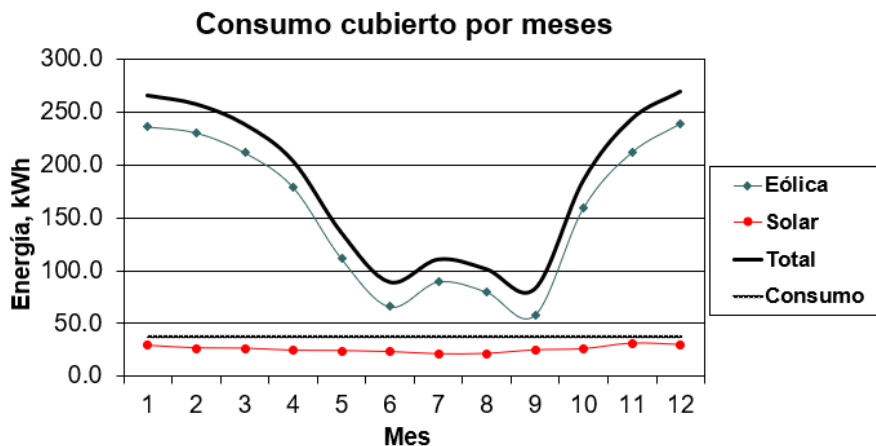


Figura 5.19. Perfil de consumo cubierto por meses en Kouba Olanga, Chad.

Para realizar dicho proceso iterativo, con el gráfico de la Figura 5.19 se puede ir comprobando si dicha potencia va cubriendo o no el consumo establecido previamente.

En este caso en particular, se observa que es el perfil eólico el que marca la generación, y que el perfil solar aporta muy poco. Este emplazamiento podría abastecerse únicamente de energía eólica, lo que le hace ideal para realizar una hibridación con solar y así reducir costes de generadores diesel o baterías.

Perfiles diarios - solar y eólico

Como se describió en el caso anterior, para llevar a cabo un estudio más exhaustivo y preciso, se ha decidido estudiar los perfiles diarios tanto de sol como de viento del emplazamiento, para poder llegar a unas conclusiones para robustas acerca de la solución de hibridación.

Por otro lado, este estudio nos ayudará a conocer en qué momentos del día hubiera déficit de energía y así poder dimensionar las baterías de acorde a las necesidades a cubrir.

Sol

El perfil diario solar no tiene mucho misterio, sabemos que la mayor radiación solar se dará en las horas centrales del día, y por otro lado, gracias al gráfico de la Figura 5.16 sabemos que el perfil solar es bastante constante a lo largo de todo el año.

Los perfiles solares de cada mes en el Chad son muy parecidos a los de Benin, por eso en el Apéndice D se ha incluido un ejemplo de los perfiles diarios tipo de cada mes del caso de Benin.

Viento

El perfil de viento diario es más arbitrario. Se ha realizado un cálculo de la potencia generada por los aerogeneradores instalados, y se puede observar en el siguiente gráfico.

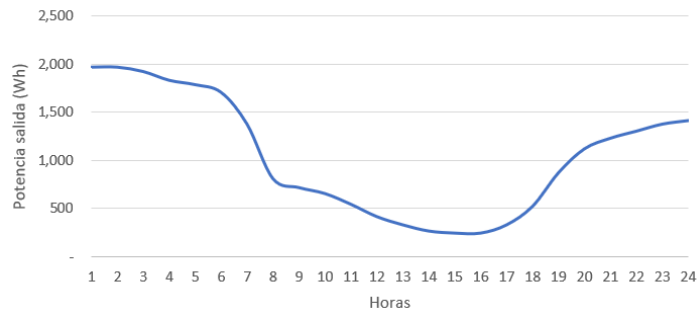


Figura 5.20. Perfil de energía generada por los aerogeneradores, a lo largo de un día tipo en Kouba Olanga, Chad.

Se observa en el gráfico de la Figura 5.20 que en las horas centrales del día la generación eléctrica es escasa. Aún siendo las horas valle del día, la generación en Wh es mucho mayor que en los anteriores casos (Benin y Senegal). Sin embargo en las horas de la noche se pueden alcanzar potencias de hasta 2000Wh en ciertas horas, lo que supone una generación brutal para solo estar empleando dos aerogeneradores de 3,5 kW.

Una vez ambos perfiles de generación solar y eólica se han determinado, se puede realizar un estudio de complementariedad entre ambas generaciones para poder determinar el déficit de energía que podría haber diariamente y así decidir, con criterio, que tamaño de baterías fuesen necesarias.

Generación - consumo

El estudio de complementariedad en el emplazamiento del Chad da como resultado un déficit de energía máximo de 3.724,35 Wh en noviembre. Esto se ha calculado teniendo en cuenta el perfil de consumo (-), junto con la generación eólica y solar (+). Se observa claramente la aportación de generación eólica en las horas que no hay sol. A diferencia de los casos anteriores, en el gráfico de la Figura 5.21 se observa como la generación total en horas de no sol alcanza los 2.000Wh.

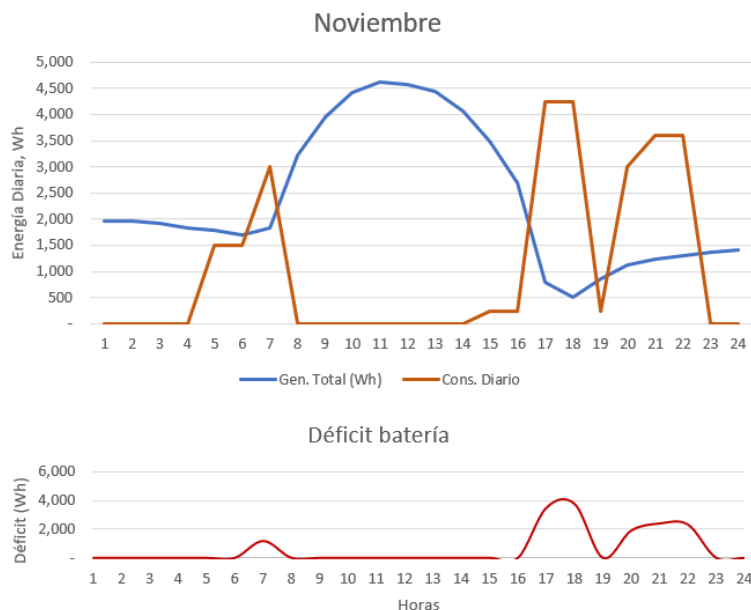


Figura 5.21. Perfil diario de generación-consumo de un día tipo de noviembre en Kouba Olanga, Chad.

Se observa en el gráfico del déficit de la batería, que de 6-8h y de 16-23h es posible que las baterías necesiten trabajar - unas 7-8 horas diarias - dónde coincide con los momentos de mayor consumo en el emplazamiento.

Notese que estos resultados están calculados a partir de información de Global Wind Atlas y Solar Wind Atlas, dónde se especifican días tipo. A la hora de llevar a cabo el estudio real, habrá que introducir datos reales que se hayan medido en el propio emplazamiento.

5.3.4. Conclusiones

Como se ha mencionado previamente, el perfil de demanda es el mismo que para el caso de Benin.

La situación en el emplazamiento de Chad es muy distinta a las anteriores, con una velocidad media anual de 5,72 m/s se puede considerar la hibridación. Observando el gráfico de la Figura 5.19, es el viento el que contribuye en su mayoría al mix energético.

Si nos fijamos en la Figura 5.21, donde se observa el perfil diario de generación y consumo, la aportación de energía eólica durante las horas de no sol es muy significativa. Esto es muy beneficioso para el sistema de generación ya que se podrá reducir el número de baterías necesarias para cubrir la demanda de la noche y el generador diesel quedaría descartado.

5.4. Desarrollos futuros

Una vez comprendido el Modelo y los resultados que devuelve, cabe mencionar que puede seguirse ampliando para futuras aplicaciones.

Este Modelo ayuda a entender la complementariedad de los sistemas de generación eólica y solar pero es cierto que no devuelve la configuración óptima de sistema de molinos, paneles solares y baterías.

Una de las mejoras que se podrían añadir al Excel es la de dimensionar las baterías. Este paso es más complicado llevarlo a cabo sin conocer el perfil real de consumo en el emplazamiento de estudio, por ello se ha preferido dejarlo mencionado para futuros desarrollos del Modelo.

Por otro lado, es cierto que las hojas son intuitivas pero están poco automatizadas. Se podría optar por programar la hoja Excel como una hoja macro donde se guarden todos los valores y genere resultados más rápido, devolviendo una configuración óptima para su posterior instalación.

Finalmente, se puede introducir un estudio económico dónde, conocidos los costes tanto de la instalación eólica como solar, pueda devolver el coste final del sistema híbrido e indicar el número óptimo de molinos y de paneles que habría que instalar, minimizando costes pero siempre cubriendo la demanda. En el estudio de casos previo, es cierto que falta poder concluir el precio final de una instalación híbrida que cubra con la demanda esperada.



Objetivos de Desarrollo Sostenible

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas en 2015, proporciona un plan compartido para la paz y la prosperidad de los pueblos y el planeta, ahora y en el futuro. En su núcleo se encuentran los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que constituyen un llamamiento urgente a la acción por parte de todos los países - desarrollados y en desarrollo - en una asociación mundial. En ellos se reconoce que la erradicación de la pobreza y otras privaciones debe ir de la mano de estrategias que mejoren la salud y la educación, reduzcan la desigualdad y estimulen el crecimiento económico, todo ello al tiempo que se aborda el cambio climático y se trabaja para preservar nuestros océanos y bosques. [UN21]

Uno de los mayores problemas a los que se tiene que enfrentar la pobreza es la escasez de recursos. La falta de recursos siempre va de la mano; los que no tiene un acceso a la energía fiable, tampoco disponen de grandes cantidades de agua para su propio desarrollo. Toda esta falta de recursos deriva en otra serie de problemas como es la falta de una educación de calidad, hambruna, la imposibilidad de acceder a un servicio sanitario digno. . .

Por ello, con este proyecto lo que se busca principalmente es alinearse con algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Puede considerarse que el estudio está alineado con los siguientes ODSs:

Dimensión	Objetivo de Desarrollo Sostenible
Sociedad	Objetivo 3: Salud y bienestar
	Objetivo 4: Educación de calidad
	Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento
Economía	Objetivo 7: Energía asequible no contaminante
	Objetivo 12: Producción y consumo responsable

Tabla A.1. ODS relacionados con este proyecto

Objetivo 3: Salud y bienestar



Figura A.1. Objetivo 3: Salud y bienestar.

Contribuye al suministro de energía eléctrica a viviendas y hospitales, permitiendo desarrollarse a la sociedad.

Objetivo 4: Educación de calidad



Figura A.2. Objetivo 4: Educación de calidad.

Contribuye al suministro de energía eléctrica a escuelas facilitando el acceso a la educación a la población. Tener acceso a la energía fiable en los hogares también permitirá que los más jóvenes puedan seguir con sus estudios, aunque el sol se haya puesto.

Objetivo 15: Agua limpia y saneamiento



Figura A.3. Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento.

Como bien se ha mencionado, el sistema híbrido puede estar destinado al bombeo de agua de pozos profundos. Tener la posibilidad de disponer de agua potable y un sistema de saneamiento es esencial para el buen desarrollo de las personas que habiten dicho emplazamiento.

Objetivo 7: Energía asequible no contaminante



Figura A.4. Objetivo 7: Energía asequible no contaminante.

Contribuye a la generación de energía mediante el uso de energías renovables y limpias en sustitución de combustibles fósiles

Objetivo 12: Producción y consumo responsable



Figura A.5. Objetivo 12: Producción y consumo responsable.

Todo proyecto de esta ONG lo que busca es educar para que, en el futuro, estas poblaciones no dependan de ayudas de terceros.

B

Modelo MESH

El objetivo de este estudio consiste en un estudio de la viabilidad de la instalación de un sistema de generación eléctrica híbrido. Dicho estudio se enfoca principalmente, desde un punto de vista técnico ya que el rendimiento de dicha planta generadora depende directamente de los recursos naturales (radiación y eólico).

En concreto, el estudio técnico se centra en el adecuado dimensionamiento de la planta solar y eólica, y consecuentemente de la complementariedad entre ambos en el sistema híbrido. Para ello, es necesario conocer los recursos disponibles en cada emplazamiento de interés y posteriormente evaluar si su contribución es suficiente para cubrir la demanda necesaria.

El manual del **Modelo de Evaluación de Sistemas Híbridos** (el “Modelo”) representa el manual que explicará el funcionamiento de la herramienta desarrollada para dichos estudios de viabilidad de recursos.

Para llevar a cabo dicho estudio, se han diferenciado distintos bloques. A continuación, en la figura siguiente, se representa la estructura que lleva el Modelo.

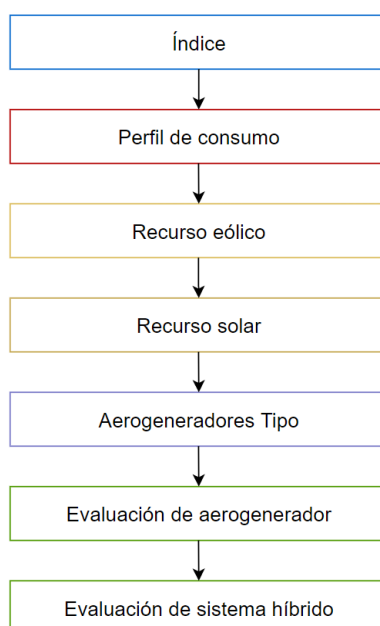


Figura B.1. Estructura de las hojas de cálculo del Modelo.

La arquitectura del Modelo intenta llevar un orden lógico de forma que su utilización sea de lo más intuitivo posible.

Por esta razón, se va a dividir el capítulo en varias secciones para poder explicar cada apartado de una forma más detallada:

- Código de colores
- Descripción de las hojas

B.1. Código de colores

Las hojas están divididas entre las que son para entrada de datos y las que únicamente muestran resultados.

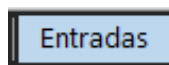


Figura B.2. Hojas para entrada de datos.

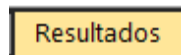


Figura B.3. Hojas de resultados.

Luego, dentro de cada hoja, podemos encontrar diferentes formas de entrada de datos. Debido a la variedad y posible complejidad, se ha optado por explicar dicho código de colores una vez se vaya a explicar la hoja de cálculo correspondiente.

B.2. Descripción de las hojas

B.2.1. Bloque 1: Perfil de consumo

- **Cargas** - [hoja de entrada]

La hoja 'Cargas' sirve para introducir el perfil de consumo esperado de la instalación.

Se hace una distinción entre distintos tipos de instalaciones, pudiendo ser estas viviendas de alto poder adquisitivo, viviendas humildes o incluso escuelas. La idea de esta segmentación se debe a que es posible que en un poblado existan distintos perfiles de consumo.

Habrá que hacer una distinción entre cargas de distintas instalaciones (A, B o ZC)

En 'Resumen', se encuentra el consumo diario total del emplazamiento.

Los campos a rellenar son los destacados en [AZUL](#).

- **Perfil Consumo Diario** - [hoja de entrada]

La hoja 'Perfil Consumo Diario' sirve para realizar una discriminación horaria del consumo de cada elemento que se desea incorporar en la instalación. Como resultado, se obtendrá un perfil diario tipo que servirá como referencia para conocer en qué momento del día se consume energía.

La única tabla a modificar es la primera, donde aparecen los distintos tipos de cargas.

Habrás que marcar con 1 (o la proporción de tiempo de esa hora que se espera estar consumiendo) las [horas](#) dónde se espera que se emplearán los elementos marcados en **AMARILLO**.

La comprobación nos indica si nuestra estimación coincide con el nº de horas especificado en la hoja 'Cargas'. En caso de no coincidir, un aviso de **'Revisar cargas'** aparecerá para que se modifique. La utilidad de esta hoja reside en realizar una buena estimación del perfil de cargas ya que será de utilidad en el posterior diseño de las baterías.

Toda esta información se empleará más adelante para dimensionar el tamaño de las baterías.

■ **Generación - consumo** - [hoja de resultados]

La hoja 'Generación - consumo' recoge la comparativa de generación eólica y solar, frente al consumo diario esperado en dicho emplazamiento.

Se busca determinar el déficit de energía diaria para poder determinar el tamaño de las baterías necesario para cubrir la demanda durante las 24h del día.

Al tratarse de una hoja de resultados, no habrá que modificar ninguna celda.

B.2.2. Bloque 2: Recursos solar y eólico

■ **Perfil Eólico Anual** - [hoja de entrada]

La hoja 'Perfil Eólico Anual' recoge la velocidad media del viento (m/s) en los distintos meses del año. Estos datos serán medidos en el propio emplazamiento de interés.

Los datos empleados pueden obtenerse de Global Wind Atlas en caso de no disponer de datos reales.

Las celdas a rellenar son las que están marcadas en **AZUL**.

Como resultado se obtiene un gráfico del perfil eólico anual en dicho emplazamiento.

■ **Perfil Solar Anual** - [hoja de entrada]

La hoja 'Perfil Solar Anual' recoge la radiación solar media mensual, en HSP/día.

Los datos empleados pueden obtenerse de Global Solar Atlas, Solargis o Meteonorm en caso de no disponer de datos reales.

Las celdas a rellenar son las que están marcadas en **AZUL**.

Como resultado se obtiene un gráfico del perfil solar anual en dicho emplazamiento.

■ **Perfil Solar Diario** - [hoja de entrada]

La hoja 'Perfil Solar Diario' recoge la radiación solar media horaria por cada mes del año. Lo que se busca es determinar la generación solar horaria en función de la potencia instalada, determinada en 'Generación híbrida_anual'.

Sobra mencionar que los datos introducidos han sido obtenidos de Global Solar Atlas. Para una mayor precisión, será necesario tomar datos reales medidos en el propio emplazamiento de interés.

- **Perfil Eólico Diario** - [hoja de entrada]

La hoja 'Perfil Eólico Diario' recoge las velocidades de viento medio horarias en un día tipo. Lo que se busca es determinar la generación eólica horaria en función de la potencia eólica instalada determinada en 'WindCAD_anual'.

Sobra mencionar que los datos introducidos han sido obtenidos de Global Wind Atlas. Para una mayor precisión, será necesario tomar datos reales medidos en el propio emplazamiento de interés.

Tanto el perfil diario eólico como solar servirán para determinar los periodos del día donde no haya generación pero si consumo, y así modelar el tamaño de las baterías.

B.2.3. Bloque 3: Aerogeneradores

- **Aerogeneradores** - [hoja de entrada]

La hoja 'Aerogeneradores' recoge tanto las curvas de potencia como la altura de instalación del buje de distintos modelos, según su potencia.

En dicha hoja, los campos a rellenar son los marcados en **AZUL**:

- Curvas de potencia: ensayo proporcionado por el fabricante.
- Altura de la torre: a la que se ha realizado dicho ensayo.
- Precio: se ha incluido este apartado para mas adelante poder calcular el precio de la instalación híbrida más adelante.

El modelo es ampliable hasta 8 aerogeneradores.

B.2.4. Bloque 4: Evaluación de sistema híbrido

- **WindCAD_anual** - [hoja de entrada]

La hoja 'WindCAD' se encarga de evaluar el rendimiento del aerogenerador seleccionado empleando probabilidad, a través de la Distribución de Weibull.

En 'Potencia del aerogenerador elegido': se debe seleccionar la potencia del aerogenerador que se va a emplear - aparecerá un desplegable dónde seleccionar los aerogeneradores disponibles. La curva de potencia que viene marcada en **rojo** se actualiza en función de la potencia del aerogenerador seleccionado perviamente.

Los campos a rellenar son los destacados en **AZUL**.

■ **Gráfico** - [hoja de resultados]

La utilidad que tiene esta hoja es la de mostrar gráficamente la compatibilidad del aerogenerador con la probabilidad de viento que existe en dicho emplazamiento.

Para el caso que se muestra más abajo, se observa que existe probabilidad de viento para un amplio rango de velocidades de viento, lo que demuestra complementariedad con el funcionamiento del aerogenerador.

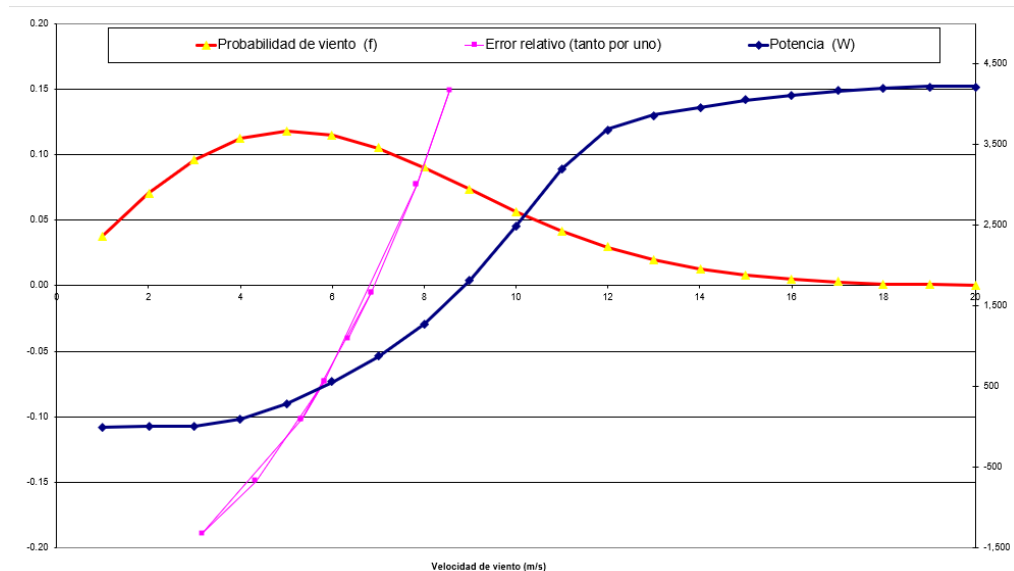


Figura B.4. Gráfico que muestra la probabilidad de viento junto con la potencia del aerogenerador seleccionado. Ubicación: Chad. Aerogenerador: 3.5kW.

■ **Generación Híbrida_anual** - [hoja de resultados]

La hoja 'Generación Híbrida_anual' se encarga de evaluar el rendimiento del sistema híbrido eólico solar. El aerogenerador ya estaría seleccionado en la hoja 'WindCAD', sin embargo falta determinar el tamaño de generación fotovoltaica óptima.

Dicha hoja está marcada como 'hoja de resultados' aunque haya que introducir una serie de valores adicionales para poder optimizar el estudio.

Como entradas tenemos el número de aerogeneradores que van a ser necesarios para cubrir la demanda, así como la potencia de los paneles solares y el número a instalar. Esto servirá para que el modelo haga una estimación de la energía total generada por la instalación híbrida y ver si se cubre toda la demanda a lo largo del año.

También se han introducido la posibilidad de añadir los costes de cada elemento (molino y paneles solares), para poder obtener una estimación del precio de la instalación, así como los rendimientos de los distintos elementos del sistema (BOS). En caso de desconocer los valores de 'Eficiencia BOS', los datos ya introducidos son generales y podrían emplearse en los estudios posteriores.

El gráfico que se obtiene es muy visual y permite evaluar rápidamente la viabilidad del sistema híbrido.

Los campos a rellenar son los destacados en **AZUL**.

■ **WindCAD_mensual** - [hoja de resultados]

La hoja 'WindCAD_mensual' tiene la misma funcionalidad que la hoja 'WindCAD_anual', sin embargo, esta presenta un análisis más detallado. La probabilidad de viento se desarrolla mensualmente a través de la Distribución de Weibull, devolviendo resultados con mayor precisión.

No es necesario modificar ningún valor de esta hoja.

■ **Generación Híbrida_mensual** - [hoja de resultados]

La hoja 'Generación Híbrida_mensual' tiene la misma funcionalidad que la hoja 'Generación Híbrida_anual', lo único que presenta un análisis más detallado ya que realiza una aproximación más real de la probabilidad de viento mes a mes.

Es posible aumentar el número de aerogeneradores (**AZUL**) en caso de no cubrir toda la demanda bajo un escenario más estricto y así obtener un escenario más óptimo.

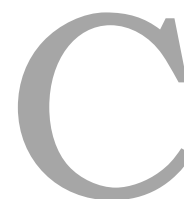
El gráfico que se obtiene es muy visual y permite evaluar rápidamente la viabilidad del sistema híbrido. Puesto que presenta mayor precisión en el cálculo de probabilidad, servirá para descartar o aceptar proyectos, en caso de duda.

■ **Generación - consumo** - [hoja de resultados]

La hoja 'Generación - consumo' recoge la comparativa de generación eólica y solar, frente al consumo diario esperado en dicho emplazamiento.

Se busca determinar el déficit de energía diaria para poder determinar el tamaño de las baterías necesario para cubrir la demanda durante las 24h del día.

Al tratarse de una hoja de resultados, no habrá que modificar ninguna celda.



Aerogeneradores

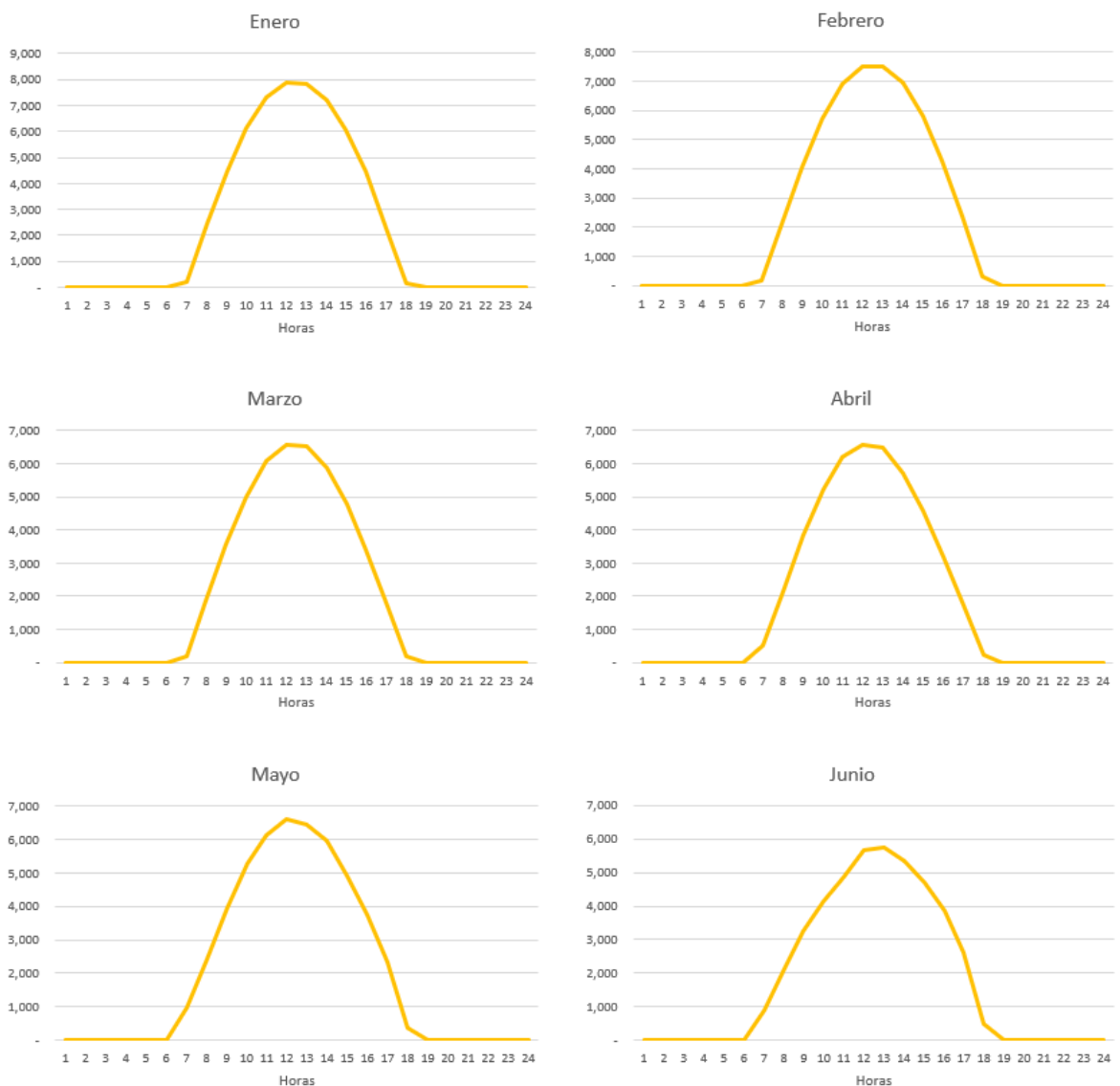
Potencia aerogenerador	1 kW	1,5 kW	2,5 kW	3,5 kW	4 kW
Altura torre	10,18m	17m	12m	18,15m	20m
Velocidad viento	Potencia de salida (W)				
1 m/s	-	-	-	-	-
2 m/s	-	-	-	1	-
3 m/s	50	7	-	14	16
4 m/s	120	57	17	95	81
5 m/s	230	141	166	283	313
6 m/s	290	270	422	553	726
7 m/s	600	443	763	874	1.339
8 m/s	840s	677	1.196	1.273	2030
9 m/s	1.090	954	1.678	1.815	2.880
10 m/s	1.220	1.237	2.173	2.486	3.779
11 m/s	1.170	1.483	2.540	3.202	4.032
12 m/s	900	1.648	2.732	3.688	4.005
13 m/s	930	1.707	2.822	3.869	3.953
14 m/s	870	1.715	2.871	3.959	3.892
15 m/s	970	1.673	2.904	4.047	3.819
16 m/s	940	1.603	2.930	4.109	3.747
17 m/s	-	1.527	2.952	4.165	3.680
18 m/s	-	1.511	2.978	4.201	3.666
19 m/s	-	-	2.995	4.219	3.683
20 m/s	-	-	-	4.222	3.688
Fabricante	SUMEC	Pika Energy	Kestrel	Sonkyo	ENAIR
Modelo				Windspot 3.5	E70Pro

Tabla C.1. Curva de potencia de aerogeneradores de pequeña potencia.

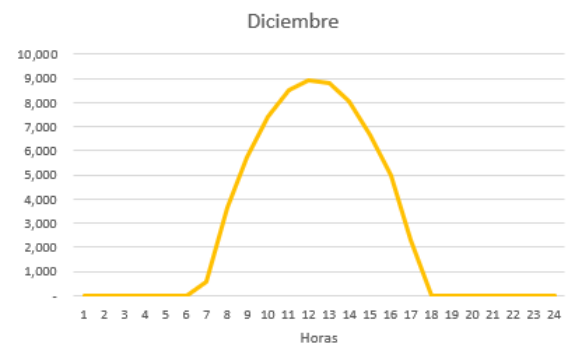
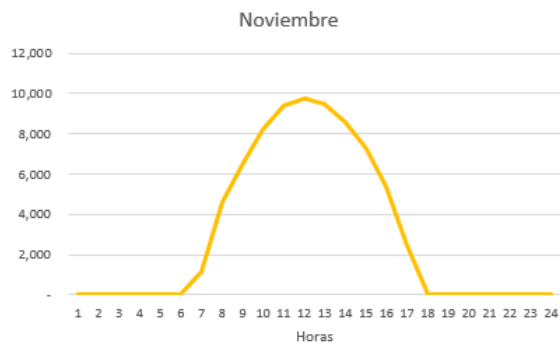
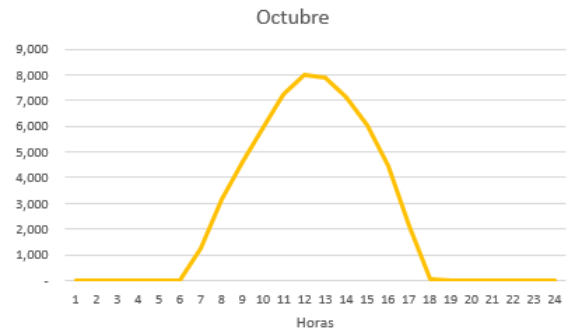
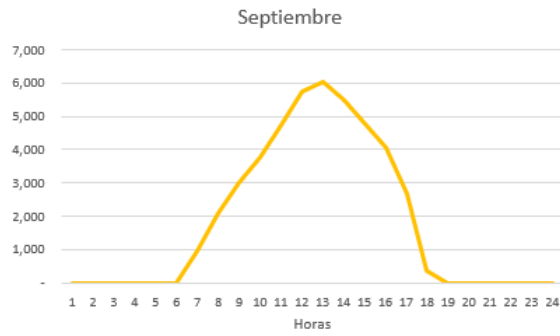
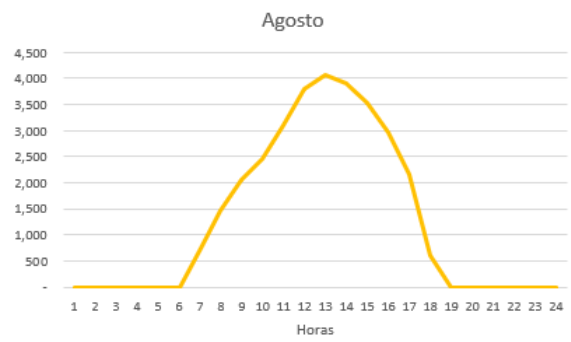
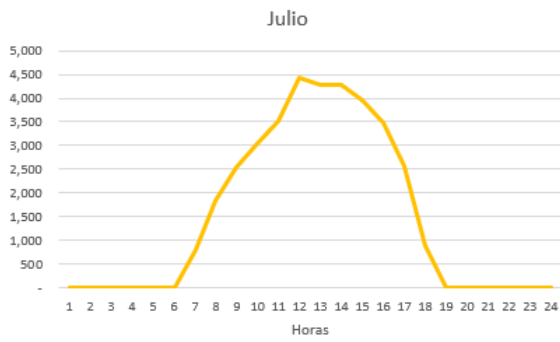
D

Perfil Solar

A continuación, se muestra el perfil solar de cada mes en el emplazamiento de Benin. Se ha querido con esto mostrar un ejemplo de los resultados obtenidos del Modelo, ya que el resto de perfiles solares (Senegal y Chad) muestran unos patrones similares.



Apéndice D. Perfil Solar



E

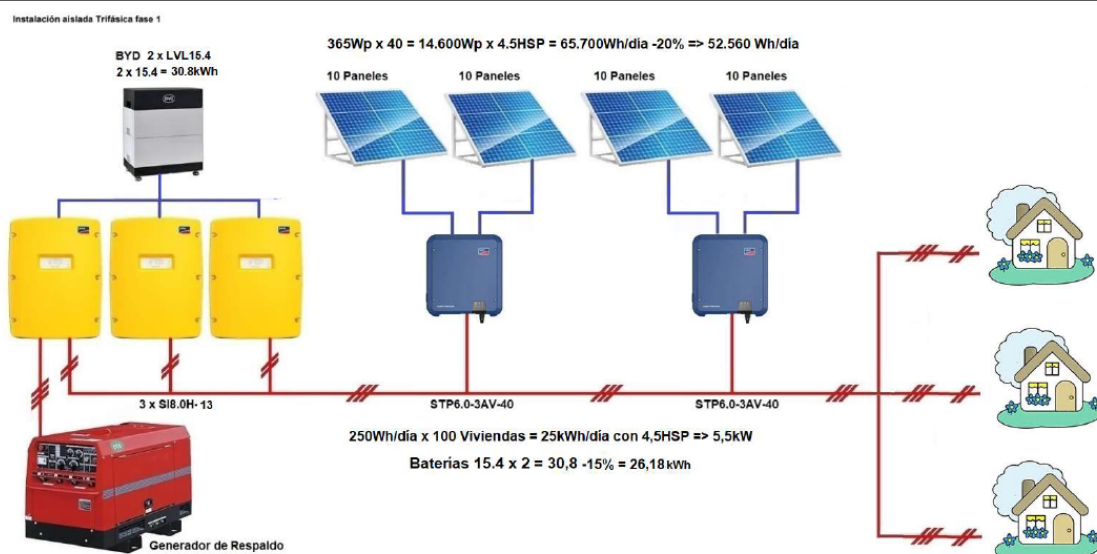
Instalación fotovoltaica Sonka, Benin

Fuente: Manos Unidas

Información sobre la instalación fotovoltaica de Sonka

El objetivo de este documento es dar una idea de la instalación de la planta en su conjunto. NO es una sustitución de los procedimientos de instalación de cada uno de los componentes facilitados por sus fabricantes.

L'objectif de ce document est de donner une idée de l'installation de l'usine dans son ensemble. Il ne remplace PAS les procédures d'installation de chacun des composants fournis par leurs fabricants.



La instalación consta de:

- 40 paneles fotovoltaicos Canadian Solar CS3U-P365 y sus soportes
- 2 Sunny TriPower 6.0
- 3 Sunny Island 8.0
- 2 Baterías de Litio ByD LVL 15.4
- 1 Motor-generador de respaldo de 13 kW
- 4 armarios para albergar componentes eléctricos.
- 2 sensores de temperatura
- 1 sistema de adquisición de datos online.

Esta dimensionada para almacenar 26kWh

$$2 \times 15,36 = 30,72 - 15\% = 26 \text{ kWh}$$

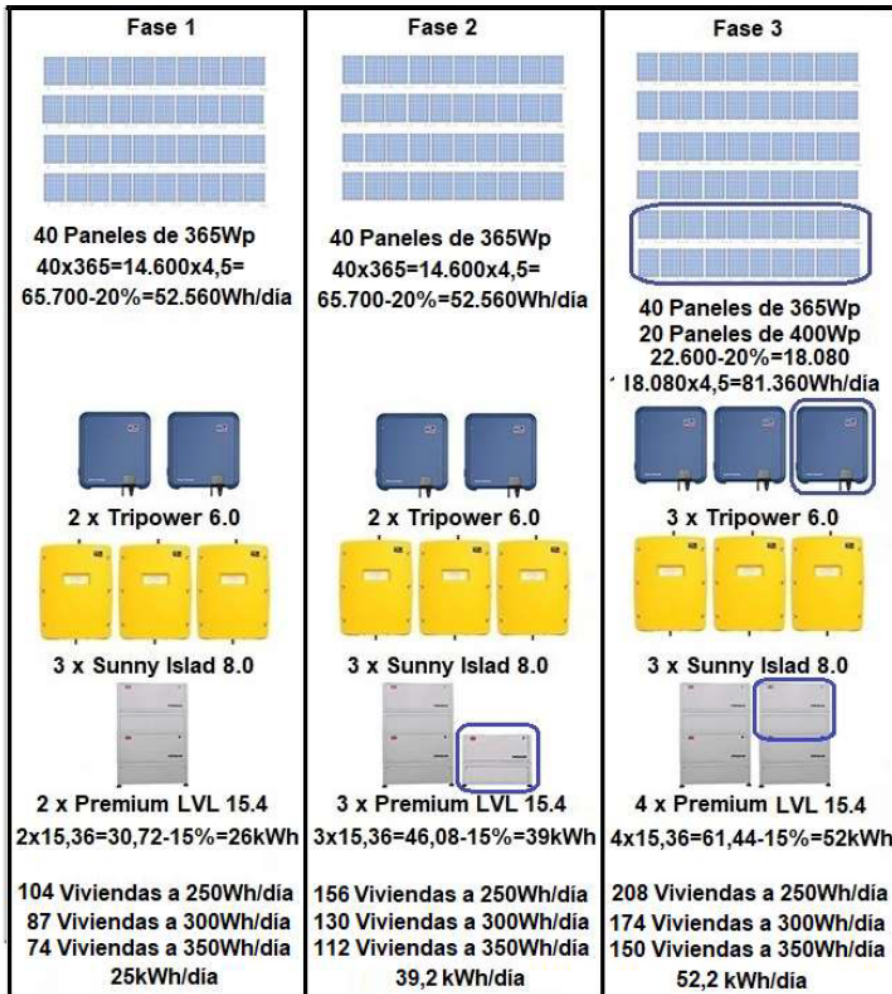
Lo que equivale a:

104 familias con un consumo medio de 250Wh/día ó

87 familias con un consumo medio de 300Wh/día ó

74 familias con un consumo medio de 350Wh/día

La instalación está diseñada para poder ampliarse en dos sucesivas fases. Este documento, se refiere a la fase 1.



7.2. - Power performance at sea-level air density 1.225 kg/m³

Table 13 shows the AC output power at sea-level air density in tabular form:

POWER PERFORMANCE Sea-level air density 1.225 kg/m ³							
Bin N°	Hub height wind speed V _i (m/s)	Output power P _i (W)	C _p _i (Rotor swept area 14.5 m ²)	Number of 1-minute data set N _i	Standard Uncertainty S _i (W)	Standard Uncertainty U _i (W)	Standard Uncertainty U _c _i (W)
2	0.545	-1.770	-1.233	873	0.041	0.262	0.265
3	1.019	-1.737	-0.185	1677	0.028	0.139	0.142
4	1.513	-1.829	-0.060	2346	0.027	0.101	0.104
5	2.010	-1.733	-0.024	2755	0.040	0.074	0.084
6	2.502	-0.568	-0.004	3182	0.131	0.020	0.132
7	3.002	5.696	0.024	3562	0.311	0.173	0.356
8	3.501	29.104	0.076	3793	0.798	0.789	1.122
9	4.004	80.781	0.142	4031	1.545	1.995	2.523
10	4.500	174.082	0.215	4075	2.502	3.989	4.709
11	5.005	313.024	0.281	4331	3.347	8.928	9.535
12	5.502	509.125	0.344	4294	4.041	13.545	14.135
13	5.994	725.949	0.380	3729	4.900	18.191	18.839
14	6.497	1020.533	0.419	3555	4.682	24.243	24.691
15	7.002	1338.796	0.439	3230	4.038	30.341	30.609
16	7.500	1669.720	0.446	3105	3.849	36.326	36.529
17	7.999	2029.790	0.447	2974	3.870	42.588	42.763
18	8.498	2437.645	0.447	2790	4.506	49.523	49.727
19	8.999	2880.435	0.445	2507	5.105	56.853	57.081
20	9.499	3343.972	0.439	2369	5.707	64.325	64.578
21	9.992	3778.565	0.427	2199	6.316	78.777	79.030
22	10.495	4019.527	0.392	1917	5.895	81.641	81.854
23	10.993	4031.846	0.342	1764	5.388	79.986	80.167
24	11.497	4029.079	0.299	1613	5.054	78.210	78.373
25	11.990	4005.162	0.262	1467	5.054	76.245	76.412
26	12.493	3984.839	0.230	1185	5.503	74.488	74.691
27	12.995	3953.423	0.203	1018	5.387	72.676	72.876
28	13.491	3921.988	0.180	810	5.518	71.010	71.224
29	13.991	3891.661	0.160	673	5.811	69.471	69.713
30	14.480	3854.091	0.143	555	6.798	67.927	68.266
31	14.987	3819.086	0.128	457	8.239	66.489	66.998
32	15.497	3772.103	0.114	407	6.626	64.926	65.263
33	15.990	3747.479	0.103	375	6.289	63.845	64.154
34	16.493	3705.181	0.093	339	6.387	62.513	62.839
35	17.009	3679.709	0.084	271	7.039	61.511	61.912
36	17.500	3664.301	0.077	261	6.728	60.753	61.124
37	17.981	3665.588	0.071	166	8.988	60.319	60.984
38	18.489	3669.586	0.065	111	10.241	59.937	60.805
39	18.999	3682.521	0.060	100	12.969	59.730	61.122
40	19.501	3652.999	0.055	67	13.031	58.872	60.297
41	19.972	3687.931	0.052	51	18.323	70.925	73.254
42	20.491	3696.947	0.048	39	19.253	70.262	72.852
43	20.973	3720.434	0.045	30	27.169	69.974	75.064
44	21.462	3708.015	0.042	20	26.291	69.040	73.876
45	22.030	3701.613	0.039	10	18.164	68.158	70.537

Table 13. Power performance at sea-level air density 1.225 kg/m³.

Figure 19 shows the power curve after normalizing data to an air density of 1.225 kg/m³, which corresponds to a site at sea-level.

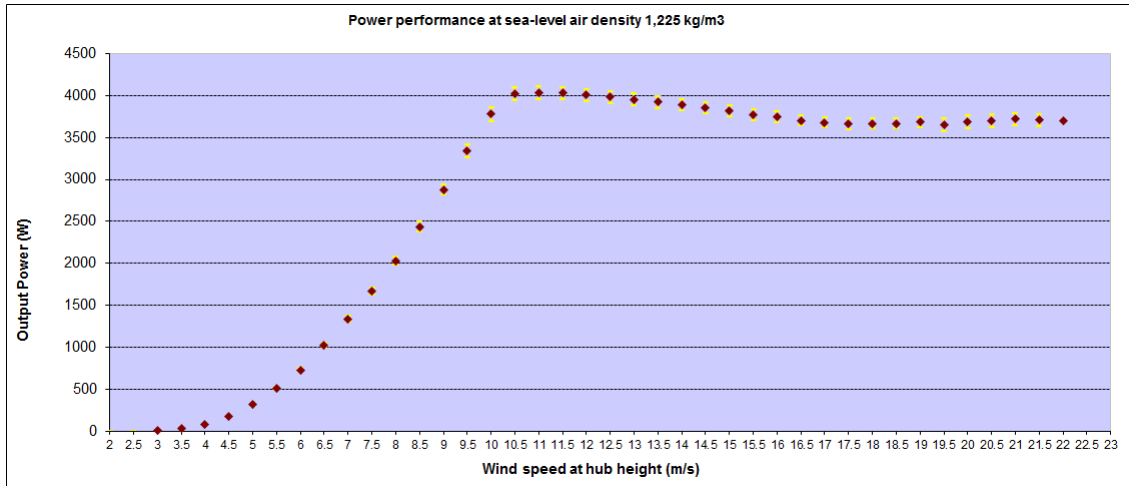


Figure 19. Power performance at sea-level air density 1.225 kg/m³

Referencias

- [ANC19] ANCB, «Le borgou», *Association nationales des communes du Benin*, sep. de 2019. dirección: <https://www.ancb.bj/index.php/association-2/borgou.html>.
- [BM21] BM, «Datos de libre acceso del Banco Mundial», *Banco Mundial*, 2021. dirección: <https://datos.bancomundial.org/>.
- [EFE18] EFE, «Mil millones de personas en el mundo no tienen acceso a la electricidad», *Agencia EFE*, 2018.
- [GWA] GWA, *Global Wind Atlas*, World Bank Group, Solargis y ESMAP. dirección: <https://globalsolaratlas.info/>.
- [Loz17] M. M. Lozano, «Electrificación de zonas rurales aisladas en África (Nikki)», Tesis doct., Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [MMU21] MMUU, «Qué hacemos», *Manos Unidas*, 2021. dirección: <https://www.manosunidas.org/que-hacemos>.
- [OCU18] OCU, «Energía minieólica, otra forma de autoconsumo», OCU, inf. téc., 2018. dirección: <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/energia-renovable/informe/energia-minieolica>.
- [RG11] S. Rolland y G. Glania, «Hybrid mini-grid for rural electrification: Lessons learned», Alliance for Rural Electrification (ARE), inf. téc., mar. de 2011.
- [RS15] C. Rodríguez-Borges y A. Sarmiento-Sera, «Competitividad de los sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos para la electrificación rural», es, *Ingeniería Mecánica*, vol. 18, págs. 12-22, abr. de 2015. dirección: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442015000100002&nrm=iso.
- [Sal] B. Salo, *Concurso de Arquitectura - Casa de la Mujer*.
- [Sal09] B. A. Salazar, «Sistema híbrido eólico - fotovoltaico», UNEMI, inf. téc., sep. de 2009.
- [Sec14] Securame, «Baterías de Li-Ion: Ventajas, desventajas, y mantenimiento», Securame, inf. téc., 2014. dirección: <https://www.securame.com/blog/baterias-de-li-ion-ventajas-desventajas-y-mantenimiento/>.
- [SES15] SESLab, «Especialización en Sistemas Fotovoltaicos», SES Lab, inf. téc., 2015. dirección: <http://seslab.org/fotovoltaico/index.html>.
- [SMA20] SMA, *Sunny Island*, 2020. dirección: <https://www.sma.de/es/productos/inversor-con-bateria/sunny-island-44m-60h-80h.html>.
- [Sol19] SoliClima, «Electrificación rural mediante energía solar y eólica», *SoliClima*, 2019.
- [UN21] UN, «Objetivos de Desarrollo Sostenible», United Nations, inf. téc., 2021.
- [Wik18] Wikipedia, «Borkou (region of Chad)», *Wikipedia*, 2018.
- [Zam20] V. G. Zamora, «Diferencias entre el sistema ON GRID y sistema OFF GRID para la generación de energía», CITE Energía, inf. téc., sep. de 2020.

