



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Comparación de fuentes de datos de irradiación, viento y temperatura y su aplicación en optimización de sistemas renovables aislados de la red

Comparison between different sources of irradiation, wind and temperature data and its application in optimisation of stand-alone renewable systems

Autor/es

Néstor Alonso Lira Ramos

Director/es

Rodolfo Dufo López

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Año 2021

Índice

1. ABSTRACT	2
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. ANÁLISIS DE LAS BASES DE DATOS	3
4. DATASETS OBTENIDOS A PARTIR DE OBSERVACIONES SATELITALES.....	4
5. DATASETS OBTENIDOS A PARTIR DE REANÁLISIS.....	4
6. LA METODOLOGÍA DE NASA POWER.....	6
7. LA METODOLOGÍA DE PVGIS	8
7.1. PVGIS-CMSAF	9
7.2. PVGIS-SARAH.....	9
7.3. PVGIS-ERA5.....	9
7.4. PVGIS-COSMO	9
7.5. PVGIS-NSRDB.....	9
7.6. REANÁLISIS EN PVGIS.....	9
7.7. CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR DEL SATÉLITE.....	10
8. LA METODOLOGÍA DE RENEWABLES.NINJA.....	10
9. RESULTADOS DE LOS DATASETS DE NASA POWER	12
10. COMPARATIVA Y RESULTADOS DE LOS DATASETS DE PVGIS.....	14
10.1 COMPARATIVA DE LOS DATOS DE IRRADIANCIA	17
11. COMPARATIVA Y RESULTADOS DE LOS DATASETS DE RENEWABLES.NINJA.....	18
11.1 COMPARATIVA DE LOS DATOS DE IRRADIANCIA	21
12. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS DISTINTAS FUENTES DE DATOS	22
12.1 NASA POWER Y RENEWABLES.NINJA	22
12.2 NASA POWER Y PVGIS	23
13. COMPARATIVA DE NASA POWER CON PVGIS EN BERLÍN.	25
14. COMPARATIVA DE NASA POWER CON RENEWABLES.NINJA EN BERLÍN	28
15. COMPARATIVA DE DATOS REALES	31
16. SIMULACIÓN CON LA HERRAMIENTA IHOGA	33
16.1 SIMULACIÓN EN LA CIUDAD DE BERLÍN	34
16.2 SIMULACIÓN EN LA CIUDAD DE SANTOS	38
16.3 SIMULACIÓN EN LA CIUDAD DE AMPARA	41
16.4 SIMULACIÓN EN LA CIUDAD DE ANTSIRANANA	44
16.5 ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES	47
17. CONCLUSIONES	48
BIBLIOGRAFÍA.....	48
ANEXO 1. RECOPIACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS UBICACIONES.....	51
ANEXO 2. IRRADIACIÓN UTILIZADA POR IHOGA.....	71
ANEXO 3. INFORMES GENERADOS TRAS LAS SIMULACIONES CON IHOGA	75

1. Abstract

En este trabajo se llevan a cabo una serie de comparativas entre conjuntos de datos, o datasets, de irradiación, temperatura y viento que han sido descargados de las tres fuentes de datos en estudio, NASA POWER, PVGIS y Renewables.ninja. Para ello se define el concepto de dataset y también se describen las metodologías de las tres fuentes de datos. Las comparativas se realizan entre los datasets incluidos en la misma fuente y los de distintas fuentes. Las principales comparativas se realizarán con datos de la ciudad de Berlín (Alemania) por tener datos disponibles en la mayoría de datasets, y se presentará una comparativa específica para la ciudad de Ujué (España) de la cual se dispone de datos medidos por una estación meteorológica terrestre. Las demás comparativas se pueden encontrar en los anexos de este documento. También se realizan simulaciones con el software iHoga con el que se obtiene una optimización en la configuración de sistemas de generación con energías renovables, en este caso, aislados de la red.

2. Introducción

El aumento del nivel de vida en las últimas décadas ha sido una tendencia mundial, de la misma forma se ha producido un incremento en la demanda de energía. Como respuesta a este fenómeno ha tenido lugar un incremento de las nuevas instalaciones de plantas de generación de energía a partir de fuentes renovables. La disminución del coste de fabricación y la mejora del rendimiento de los generadores fotovoltaicos ha permitido que usuarios particulares instalen pequeños generadores tanto en los núcleos urbanos como en las zonas rurales. También es cada vez más común ver instalaciones de grandes dimensiones a base de tecnología fotovoltaica y eólica.

La generación de energía a partir del viento o de la irradiancia, que es la potencia de la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre, se caracterizan por su variabilidad y la dificultad para predecir su disponibilidad en el corto plazo, esto conlleva cierta dificultad a la hora de integrar generadores eólicos o fotovoltaicos a la red pública de distribución eléctrica.

Tener un pronóstico fiable de la disponibilidad del recurso eólico y solar en un corto-medio plazo puede llegar a ser de gran interés para el sector energético. De esta forma, si se tienen datos objetivos sobre la disponibilidad de estos recursos de energía renovable, se impulsaría aún más el despliegue de las renovables, porque se solventarían muchos de los impedimentos de este despliegue relacionados con la intermitencia de estos recursos.

Una mejora sustancial en la predicción los recursos renovables beneficiaría a diversos sectores de la sociedad:

- por un lado, a los inversionistas en energías renovables ya que tomarían decisiones más objetivas y reducirían la incertidumbre de sus inversiones,
- los operadores del sistema eléctrico de los países tendrían menos dificultades a la hora de ajustar la generación a la demanda de energía,
- el medio ambiente se vería beneficiado por un descenso masivo de la generación eléctrica con combustibles fósiles debido al impulso que tendrían los proyectos con energías renovables,
- y la sociedad en general, ya que, vería incrementado su calidad de vida debido a que disminuiría la contaminación atmosférica y se generarían más empleos en un sector en auge.

Denominaremos datasets a los conjuntos de datos que están a disposición de los usuarios y que consisten en los registros históricos de parámetros climáticos y de irradiancia o irradiación, que son respectivamente la potencia y la energía de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre, obtenidos a partir de observaciones satelitales o de reanálisis.

Las medidas de campo son consideradas como la estimación más fiable para obtener datos meteorológicos y de irradiancia posteriormente realizar un pronóstico. Pese a esto, en situaciones en donde se requieran datos de largos períodos de tiempo y que abarquen grandes áreas, resultaría inviable considerar a las estaciones terrestres. Una estación de medida debe disponer de equipamiento de calidad y supone un coste añadido la realización periódica de mantenimiento y calibraciones de los equipos para que las medidas que se tomen sean fiables.

Por esta razón, es necesario hacer una validación de los datasets o conjuntos de datos, que se obtienen mediante observaciones satelitales o reanálisis de forma que estas dos fuentes de datos generen datos confiables para su utilización en la práctica.

Una validación consiste en cotejar los datasets obtenidos de los distintos métodos, con mediciones realizadas en estaciones de medida a nivel del suelo [2]. De esta forma se puede tener una estimación de la incertidumbre que existe en los resultados que muestran los datasets.

Los datos de irradiancia que se obtienen de las observaciones satelitales y los obtenidos mediante reanálisis tienen una menor precisión que las medidas tomadas en campo por estaciones terrestres de medida. Sin embargo, hay grandes evidencias de que pueda aumentar la utilización de datos obtenidos por estos dos métodos y llegar a sustituir a las estaciones terrestres de medida [1].

3. Análisis de las bases de datos

Las fuentes de los datos que vamos a analizar son NASA POWER, Renewables.ninja y PVGIS.

NASA POWER que es la plataforma que ofrece la NASA (por sus siglas en inglés, *National Aeronautics and Space Administration*) (<https://power.larc.nasa.gov/>) para acceder a estos datasets. Esta plataforma además de proporcionar datos de irradiancia, viento y temperatura también tiene a disposición de los usuarios herramientas útiles para el sector de las energías renovables, la arquitectura y la agricultura.

PVGIS (por sus siglas en inglés, *Photovoltaic Geographical Information System*) (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>) es una aplicación web desarrollada por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, JRC (por sus siglas en inglés, *Joint Research Centre*), desde la cual se puede descargar datos de irradiancia, viento y temperatura.

Renewables.ninja es una plataforma web permite descargar datos de viento, irradiancia y otros parámetros climáticos y también realizar una estimación de la producción energética de generadores fotovoltaicos y eólicos (<https://www.renewables.ninja/>).

Estos portales web se basan en diversos datasets entre los que se pueden encontrar datasets satelitales y de reanálisis.

Los datos necesarios para hacer las comparativas se descargaron de 20 ubicaciones repartidas por todo el mundo, incluyendo una ubicada en España. La localización ubicada en España coincide con la estación meteorológica de Ujué en Navarra, de esta forma se realizará una comparativa entre datasets de observaciones satelitales con un registro real de la estación terrestre de medida. Los datos descargados consisten en la irradiación por hora (para PVGIS y Renewables.ninja) o diaria (para NASA POWER), la temperatura ambiente a 2 m sobre el suelo o T2m y la velocidad del viento una altura de 10 m sobre el suelo o WS10m.

A continuación, se enumeran las 20 localizaciones con sus coordenadas (lat, long) cuyos datos analizaremos:

1. Ampara, SriLanka (**7.283333, 81.666667**)
2. Antsiranana, Madagascar (**-12.311, 49.294**)

3. Asmara, Eritrea (15.333333, 38.916667)
4. Bangkok, Thailandia (13.75, 100.516667)
5. Berlín, Alemania (52.52, 13.405)
6. Budapest, Hungría (47.498333, 19.040833)
7. Cà Mau, Vietnam (9.183333, 105.15)
8. Dublín, Irlanda (53.3425, -6.265833)
9. El Cairo, Egipto (30.056111, 31.239444)
10. Fyn, Dinamarca (55.350278, 10.355833)
11. Hyderabad, India (17.366667, 78.466679)
12. Maseru, Lesoto (-29.31, 27.48)
13. Merbok, Malasia (5.716667, 100.416667)
14. Montevideo, Uruguay (-34.63565, -58.36465)
15. Ometepe, Nicaragua (11.5, -85.583333)
16. Santos, Brasil (-23.951111, -46.338889)
17. Steinkjer, Noruega (64.0174959, 11.4973218)
18. Tshela, RD Congo (-4.966667, 12.933333)
19. Ujué, Navarra, España (42.512744436, -1.5097369)
20. Vaasa, Finlandia (63.1, 21.616667)

4. Datasets obtenidos a partir de observaciones satelitales

No cabe duda de que la manera más apropiada de medir la radiación solar es a través de estaciones terrestres de medida. Sin embargo, estas estaciones requieren de determinadas condiciones de equipamiento y de un mantenimiento periódico y esto supone un gran coste. Por esta razón, se ha vuelto cada vez más común utilizar datos satelitales para estimar la irradiancia disponible en una ubicación específica. [2]

La principal desventaja a la hora de utilizar la información recogida por los satélites es que la irradiancia o radiación solar a nivel del suelo debe calcularse utilizando una serie de algoritmos matemáticos bastante complicados, que además requieren datos sobre vapor de agua en la atmósfera, aerosoles y ozono, lo cual puede afectar a la exactitud de los resultados. Además de que los resultados estarán disponibles únicamente a las áreas abarcadas por los satélites. [2]

Sin embargo, la literatura consultada [1] nos indica que los datasets que se obtienen a partir de observaciones satelitales se ajustan más a la realidad que aquellos obtenidos a partir de reanálisis.

Utilizando algoritmos computacionales a la información de radiación solar captada por los satélites se le añade el efecto de la atenuación de la radiación que ocurre por los gases de la atmósfera, de esta forma se obtiene una aproximación a la radiación que incide sobre la superficie terrestre. En la sección dedicada a la metodología de PVGIS se describe los métodos de cálculo utilizados para la obtención del dataset satelital PVGIS-SARAH.

CMSAF, SARAH y NSRDB son ejemplos de datasets generados a partir de observaciones satelitales.

5. Datasets obtenidos a partir de reanálisis

Se entiende por reanálisis al procedimiento en el cual se combinan un sistema de asimilación de datos con un modelo de la dinámica atmosférica para predecir el estado del sistema meteorológico en todo el planeta [6]. El resultado de esta modelización es capaz de proporcionar una estimación de los parámetros climáticos y de irradiancia en lugares en donde no se tiene ningún registro.

En un sistema de asimilación se manipulan sistemáticamente datos de distintas fuentes para sintetizar un modelo matemático. La dinámica que causa un determinado fenómeno se supone inherente a los datos recogidos. Una vez sintetizado el modelo matemático, este simulará con mayor precisión un entorno o ubicación en particular cuantas más referencias haya tenido y cuanto mayor sea la calidad de estos inputs [3].

Los inputs necesarios para generar el modelo provienen de sistemas de observación como pueden ser globos meteorológicos, observaciones satelitales de viento o radiación solar, aeronaves, boyas meteorológicas o estaciones terrestres de medida [4].

En esencia, un reanálisis parte de datos difíciles de manipular, emplea un control de calidad automatizado y genera unas series temporales de datos sintetizados y con una cobertura global, en la mayoría de los casos, y abarcan un amplio periodo de tiempo. Por esta razón los datasets de reanálisis son ampliamente utilizados para aplicaciones comerciales en el sector energético.

En la siguiente tabla podemos ver enumerados ejemplos de datasets de reanálisis de libre acceso con sus características.

Institución/modelo	Año de lanzamiento	Periodo abarcado	Resolución espacial (lat x lon, grados)	Resolución temporal (horas)	Alturas de la velocidad del viento	Otras alturas del modelo
ECMWF/ERA40	2004	1957-2002	1.125x1.125	6	10 m	60
ECMWF/ERA-Interim	2006	1979-presente	0.75x0.75	6	10 m	60
ECMWF/ERA-20C	2012	1900-2010	1.125x1.125	3	10-100 m	91
ECMWF/ERA5	2017	1979-presente	0.281x0.281	1	10-100 m	137
JMA/JRA-25	2004	1979-2004	1.125x1.125	6	10 m	40
JMA/JRA-55	2013	1958-presente	0.5625x0.5625	6	10 m	60
NASA/MERRA	2009	1979-presente	0.5x0.667	1	2, 10, 50 m	72
NASA/MERRA-2	2015	1980-presente	0.5x0.625	1	2, 10, 50 m	72
NCEP/R2	2001	1979-2012	2.5x2.5	6	10 m	28
NCEP/CFSR	2009	1979-2010	0.3125x0.3125	1	10 m	6
NCEP/CFSv2	2011	2011-presente	0.205x0.205	1	10 m	6
NOAA/20CRv2	2010	1871-2011	2x2	6	10 m	28
Un, Se presentan resoluciones de modelos nativos, los datos pueden estar disponibles a resoluciones más bajas mediante la reducción estadística.						
B, ECMWF utiliza redes gaussianas reducidas con menor resolución horizontal (longitud) más cercana a los polos.						

Tabla 1 Ejemplos de datasets de reanálisis de libre acceso con sus características [6].

Los reanálisis también tienen la posibilidad de deducir parámetros en lugares en donde no se tiene registro, por ejemplo, velocidades de viento a 50m (las estaciones meteorológicas suelen medir hasta 10 m), o en lugares remotos o en mar abierto [6].

Los reanálisis atmosféricos, como el MERRA-2 (de origen americano), ERA5 (de origen europeo) y el JRA-55 (de origen japonés) son ampliamente utilizados en estudios meteorológicos y climáticos y proporcionan parámetros muy útiles no solo para modelado numérico sino también para aplicaciones comerciales como en el sector energético, los recursos hídricos y la agricultura. Como producto sintético de la atmósfera terrestre, la calidad del reanálisis atmosférica depende de la calidad y la cantidad de observaciones asimiladas y del rendimiento de los modelos de previsión y asimilación [7].

6. La metodología de NASA POWER

La GMAO (por sus siglas en inglés, *Global Modeling and Assimilation Office*) es una organización que mediante modelos informáticos y técnicas de asimilación de datos se dedica a realizar mejoras en el programa de la NASA de Observaciones de la Tierra. Las personas que forman la GMAO realizan investigaciones, desarrollan modelos y sistemas de asimilación para apoyar a las misiones de la NASA [8].

La GMAO produce y distribuye una serie de productos entre los que se encuentran los datasets a partir de reanálisis MERRA y su versión posterior MERRA-2, que proporciona los datos meteorológicos, y datasets basados en observaciones satelitales como es el FLASHFlux, que proporciona los datos de irradiancia en NASA POWER.

El proyecto POWER (por sus siglas en inglés, *Prediction of Worldwide Energy Resources*) surge en el año 2003 a partir de su antecesor SSE (por sus siglas en inglés, *Surface Meteorology and Solar Energy Project*). Tras las experiencias exitosas de SSE, se decide integrarlo junto con otros dos nuevos módulos con aplicaciones en arquitectura y agricultura en una nueva plataforma que mantiene las ventajas de sus versiones previas, a partir de todo esto surge POWER. La versión actual de POWER es la versión 8, que es la continuación de SSE versión 7 y hereda de este la funcionalidad GIS (en inglés, *Geographic Information System*) [9].

Los datos meteorológicos en la versión actual de POWER están basados en un único modelo de asimilación de la GMAO. Los datos meteorológicos actualizados se obtienen a partir del dataset de reanálisis de la GMAO MERRA-2 y del sistema de procesamiento de datos GEOS 5.12.4. [10].

Los datasets de MERRA-2 y GEOS 5.12.4 tienen la misma resolución espacial y temporal, los datos de GEOS 5.12.4 son procesados diariamente por el equipo del proyecto POWER y anexados como continuación de lo existente en MERRA-2 de forma que los datos estén lo más actualizados posibles, con un retardo de 2 días al día actual. Por otra parte, los datos de MERRA-2 se actualizan normalmente cada varios meses [11].

Fuente	Cobertura temporal		Retraso
GMAO MERRA-2	1 de enero de 1981	Mes antes de la hora real	1 mes
GEOS 5.12.4 FP-IT	Fin de MERRA-2	Casi en tiempo real	2 días

Tabla 2 Fuentes de datos de NASA POWER para datos climáticos. [FUENTE: <https://power.larc.nasa.gov/docs/>]

Los datos de radiación solar de la versión actual de POWER versión 8, se obtienen a partir del archivo del GEWEX/SRB que es el proyecto SRB (en inglés, *Solar Radiation Budget Project*) dentro del proyecto GEWEX (en inglés, *Global Energy and Water cycle Exchanges*) y también de los datos que

procesa el equipo de POWER que provienen del CERES FLASHFlux versión 3 de forma que se da continuidad a la base de datos [9].

El proyecto CERES (en inglés, *Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) se encarga de proporcionar información sobre el SRB (en inglés, *Earth's radiation Budget*) [12].

Los registros de datos en los datasets disponibles en POWER se encuentran con una resolución espacial de 0.1º latitud por 0.1º longitud (55 x 55 km aprox.) y resolución temporal de 1 día [11]. Los datos de viento y temperatura se obtienen a partir del reanálisis MERRA-2 y la irradiancia se obtiene de las fuentes de la siguiente tabla:

Fuente	Cobertura temporal		Retraso
GEWEX/SRB 3.0	1 de julio de 1983	31 de diciembre de 2007	-
CERES FLASHFlux Versión 2	1 de enero de 2008	31 de diciembre de 2012	-
CERES FLASHFlux Versión 3	1 de enero de 2013	casi en tiempo real	5-7 días

Tabla 3 Fuentes de datos de irradiancia de NASA POWER con su cobertura temporal y el retraso al tiempo real [FUENTE: <https://power.larc.nasa.gov/docs/>].

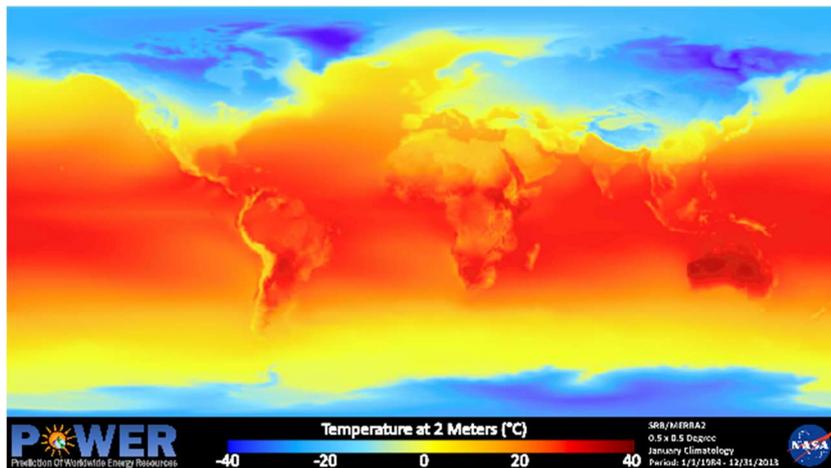


Ilustración 1 Representación gráfica de la temperatura (T2m) global de NASA POWER [FUENTE img: <https://power.larc.nasa.gov/docs/gallery/>].

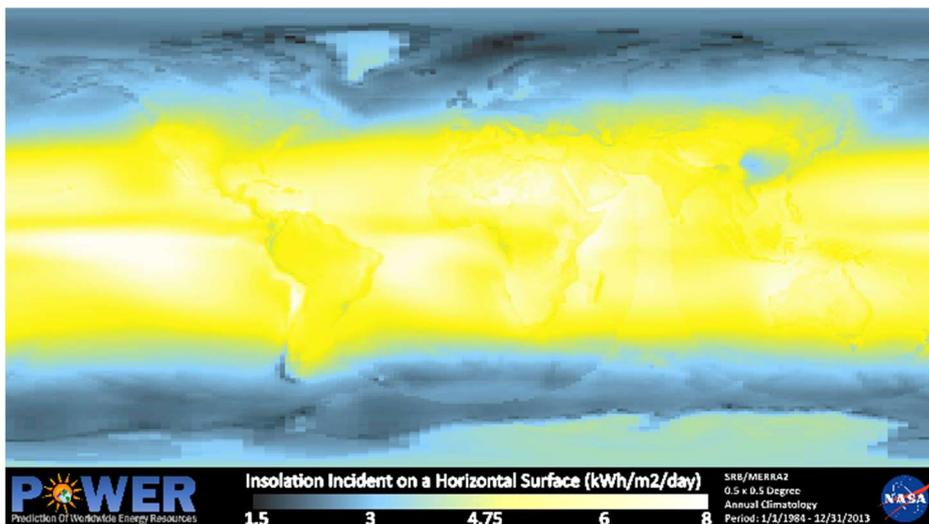


Ilustración 2 Representación gráfica de la irradiancia diaria (kWh/m2/día) global de NASA POWER. [FUENTE img: <https://power.larc.nasa.gov/docs/gallery/>]

7. La metodología de PVGIS

PVGis (en inglés, *Photovoltaic Geographical Information System*) es una aplicación web desarrollada por el centro europeo JRC (en inglés, *Joint Research Centre*) que proporciona información de radiación solar y rendimiento de sistemas fotovoltaicos, además de parámetros de viento a una altura de 10m (WS10m) y temperatura del aire a una altura de 2m (T2m). Los algoritmos utilizados para procesar la información de radiación solar obtenida por satélites fueron desarrollados con la colaboración del CMSAF (en inglés, *Satellite Application Facility dedicated to Climate Monitoring*) de EUMETSAT (en inglés, *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*).

En PVGIS se encuentran disponibles distintos datasets disponibles según la localización en donde se desee obtener los datos. El estándar de tiempo de los datasets es UTC.

En la siguiente imagen se representan las bases de datos que se configuran por defecto en las distintas zonas geográficas abarcadas en PVGIS.

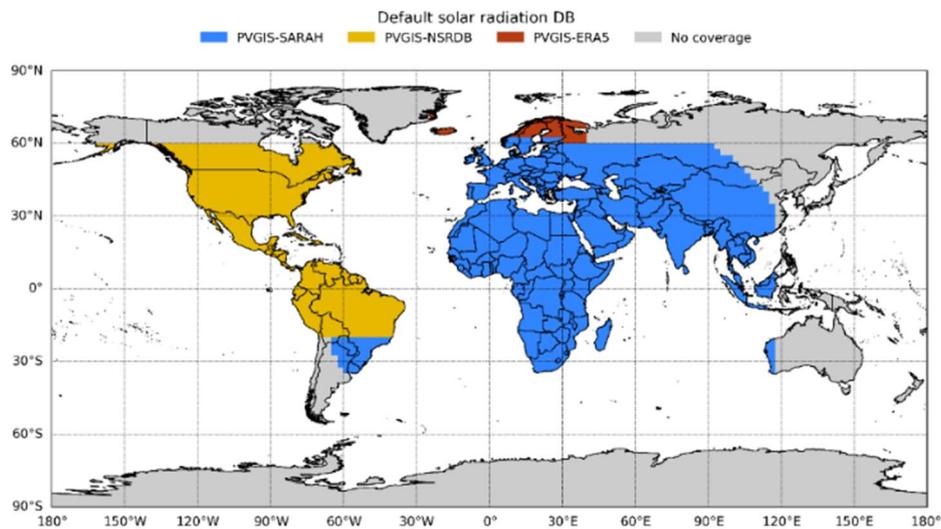


Ilustración 3 Mapamundi mostrando las zonas de cobertura de los datasets que se configuran por defecto en PVGIS según la ubicación. [FUENTE img: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>]

En la siguiente figura se puede observar las distintas coberturas de los datasets de PVGIS:

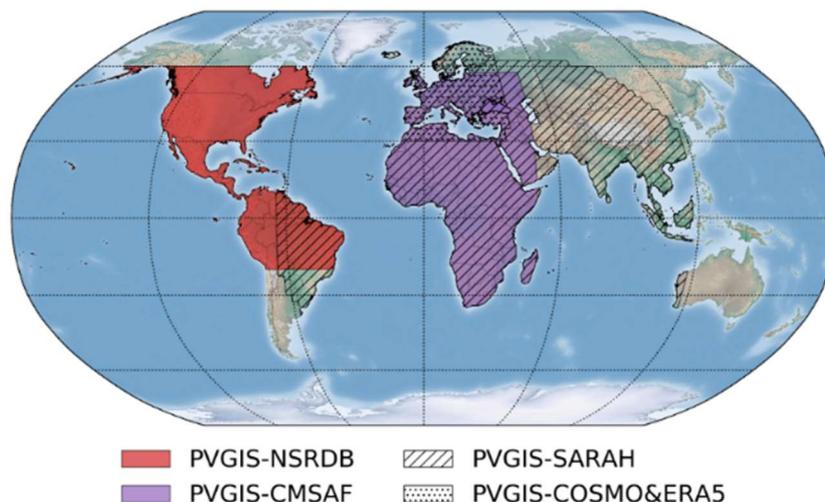


Ilustración 4 Mapamundi mostrando las zonas de abarcadas por los datasets en PVGIS. [FUENTE img: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>]

La cobertura de Europa, África y una gran parte de Asia se debe gracias a los satélites METEOSAT, los usuarios tienen a su disposición estos datos a través de los datasets satelitales de PVGIS-CMSAF y PVGIS-SARAH [13] que también abarca una zona del sur de América.

La cobertura del continente americano proviene del dataset NSRDB (en inglés, *National Renewable Energy Laboratory*) y está a disposición de los usuarios en el dataset PVGIS-NSRDB [13].

Los satélites METEOSAT de primera (MFG) y segunda (MSG) generación tienen una cobertura de $\pm 65^\circ$ en latitud y longitud, más allá de esta cobertura disminuye la resolución e incrementa la incertidumbre [17]. Por esta razón, para abarcar latitudes altas se recurre a datasets basados en reanálisis como son PVGIS-COSMO y PVGIS-ERA5 [13].

Los datos de temperatura y viento que utiliza PVGIS provienen de la información de pronóstico operacional de ECMWF [13].

7.1. PVGIS-CMSAF

PVGis-CMSAF es un dataset satelital que se llevó a cabo con la colaboración de CMSAF, abarca las áreas de Europa y África en el período 2007-2016 [14].

7.2. PVGIS-SARAH

PVGis-SARAH también es un dataset satelital disponible en PVGIS, que surgió como una variante del PVGIS-CMSAF con una mayor cobertura, aunque con una resolución más burda. PVGIS-SARAH utiliza imágenes recogidas por los satélites Meteosat y proporciona datos de irradiancia en intervalos horarios [14].

7.3. PVGIS-ERA5

PVGis-ERA5 es el más reciente dataset basado en el reanálisis de ECMWF-ERA5 que tiene una cobertura global, sin embargo, en PVGIS-ERA5 solo se abarca Europa [2]. Mas adelante veremos cómo es el que mejor se aproxima a los datasets satelitales.

7.4. PVGIS-COSMO

PVGis-COSMO es un dataset basado en el reanálisis COSMO-REA que abarca Europa y el norte de África, sin embargo, en PVGIS-COSMO solo abarca Europa [2].

7.5. PVGIS-NSRDB

PVGis-NSRDB es un dataset basado en el dataset de reanálisis NSRDB desarrollado por el *National Renewable Energy Laboratory* de Estados Unidos. Abarca la mayor parte del continente americano. [2]

7.6. Reanálisis en PVGIS

PVGIS utiliza también dos conjuntos de datos de radiación solar basado en reanálisis para el continente europeo:

- ECMWF ERA-5 que tiene una cobertura global y una resolución de 40km, ha sido producido por el Centro Europeo de Pronóstico meteorológico de Media Distancia (ECMWF).
- COSMO-REA que abarca Europa y el norte de África y tiene una resolución de 6km.

Estos dos conjuntos de datos proporcionan la irradiación directa y difusa. Por otra parte, en la versión PVGIS 5 solamente se aprovecha la cobertura de Europa de estos dos conjuntos de datos [2]. Para el continente americano se encuentra disponible el dataset de reanálisis de PVGIS-NSRDB.

7.7. Cálculo de la radiación solar del satélite

Una descripción sencilla sobre los métodos utilizados por los datasets satelitales PVGIS-CMSAF y PVGIS-SARAH sería la siguiente [2]:

- El primer paso en el cálculo es utilizar las imágenes satelitales y estimar la influencia de las nubes de la atmósfera en la radiación solar. Las nubes tienden a reflejar la luz solar entrante de forma que la radiación que llega al suelo es menor. La reflectividad de las nubes se calcula mirando el mismo píxel de imagen de satélite a la misma hora todos los días en un mes. A continuación, el método supone que el píxel más oscuro del mes es el que corresponde al cielo despejado. Para los demás días, la reflectividad de la nube se calcula relativamente al día del cielo despejado.
- En un segundo paso, el método calcula la radiación solar en condiciones en las que no existe la influencia de las nubes, utilizando la teoría de transporte radiativo en la atmósfera para incluir el efecto de atenuación por presencia de aerosoles, vapor de agua y ozono en la atmósfera.
- El siguiente paso sería juntar esta radiación sin nubosidad con información sobre la reflectividad de las nubes. Y como resultado se obtiene el dataset satelital que tiene en cuenta todos estos factores.

Para la versión actual de PVGIS, los datos satelitales utilizados para las estimaciones de radiación solar provienen de los satélites METEOSAT que cubren Europa, África y la mayor parte de Asia. Dependiendo del tipo de satélite, las imágenes se capturan cada 15 o 30 minutos. Para PVGIS se utilizan imágenes en intervalos de 1 hora. La resolución de las imágenes satelitales varía, donde mayor resolución se obtiene es justo debajo del satélite disminuyendo gradualmente conforme aumenta la distancia a este punto. La resolución máxima es de hasta 4km [2].

8. La metodología de Renewables.ninja

Renewables.ninja es una plataforma de libre acceso que utiliza el dataset basado en reanálisis MERRA-2 y el dataset satelital SARAH para realizar simulaciones de la producción de plantas de generación eólica o fotovoltaica [16]. Los resultados se presentan en horario UTC y en horario local.

En esta plataforma se encuentran disponibles desde 1980 hasta 2019 datos de MERRA-2 y hasta 2015 datos de SARAH. Entre los datos disponibles se encuentran la irradiancia, viento y parámetros climáticos como la temperatura, nubosidad, precipitaciones, entre otros. Estos datos se descargan en series temporales horarias y con este mismo formato se muestran los resultados de producción de energía de las simulaciones.

Las simulaciones se realizan teniendo en cuenta la localización y las características de los generadores eólicos o fotovoltaicos, basándose en los datasets MERRA-2 y SARAH, de forma que se tenga resultados estimados para todo el planeta [15].

Mientras que el dataset de reanálisis MERRA-2 tiene una cobertura global, el dataset satelital SARAH cubre una buena parte de Europa y el norte de África, como se muestra en la siguiente imagen en la que se resalta la cobertura de SARAH.



Ilustración 5 Área abarcada por SARAH en Renewables.ninja que corresponde a una parte de Europa, norte de África y Asia Occidental. [FUENTE img: www.renewables.ninja]

El dataset de SARAH solo ofrece datos de irradiación, sin embargo, MERRA-2 dispone además de datos meteorológicos.

El objetivo principal del apartado Solar PV de Renewables.ninja es presentar una curva horaria de resultados de la generación fotovoltaica empleando un modelo de generador fotovoltaico que permite al usuario definir ciertos parámetros.

Para definir el modelo de generador hay que introducir la potencia en kW, las pérdidas energéticas porcentuales, el sistema de rastreo solar (un eje, dos ejes o ninguno) y su posición en grados sexagesimales (inclinación y acimut de los paneles). Nuestra intención fue obtener datos de irradiación ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) que incide sobre una superficie coplanar al suelo de 1m^2 . Para obtener estos resultados se definió un generador de una potencia de 1kW, sin considerar pérdidas, sin ningún sistema de seguimiento solar y paralelo a la superficie terrestre.

Para obtener los datos de viento, WS10m, nos dirigimos al apartado “Wind” y del mismo modo que en el apartado Solar PV, hay que introducir los parámetros para el modelo de generador eólico, estos parámetros son, la potencia en “kW” y la altura del buje en “m”. Por defecto aparece introducida una altura de buje de 80 m, por lo que para conseguir los datos de velocidad de viento hemos introducido 10 m de altura de buje.

La bibliografía consultada [15] [16] indica que se podrían utilizar factores de corrección para cada país basados en comparaciones con medidas de campo y así se podría alcanzar una precisión alta en las estimaciones, sobre todo con los datasets de reanálisis.

Los datos de temperatura fueron descargados desde el apartado “Weather” y basta con marcar la opción “Air temperature” para obtener la temperatura a 2m sobre el suelo, T2m.

9. Resultados de los datasets de NASA POWER

En este apartado se presenta una recopilación de los resultados de la fuente NASA POWER en intervalos de tiempo de 1 año.

En la siguiente tabla se muestran los resultados anuales de irradiación obtenidos de las 20 ubicaciones analizadas en unidades de “kWh/m²/año”:

POWER NASA						
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ampara	1797	1813	1846	1761	1776	1790
Antsiranana	2141	2108	2083	2167	2084	2117
Asmara	2270	2309	2273	2205	2171	2235
Bangkok	2003	1943	1937	1839	1938	1931
Berlín	1071	1157	1112	921	965	983
Budapest	1239	1376	1395	1165	1142	1208
Cà Mau	1790	1764	1735	1717	1808	1890
Dublín	1066	1020	1017	997	959	983
El Cairo	2158	2115	2119	2092	2072	2026
Fyn	1128	1147	1125	1052	1051	1022
Hyderabad	1955	2065	2002	1859	1932	1936
Maseru	1947	1926	1948	2019	1987	2035
Merbok	1758	1715	1722	1693	1739	1773
Montevideo	1742	1781	1699	1771	1673	1729
Ometepe	1940	1935	1932	1908	1934	1989
Santos	1670	1653	1714	1543	1730	1549
Steinkjer	803	784	772	710	788	731
Tshela	1661	1626	1563	1460	1426	1443
Ujué	1510	1574	1575	1467	1495	1534
Vaasa	953	970	939	896	929	874

Tabla 4 Recopilación de resultados de irradiación anual en las 20 ubicaciones analizadas (kWh/m²/año) en NASA POWER.

En esta recopilación de resultados cabe destacar que los valores anuales son muy cercanos y dan una noción de la disponibilidad del recurso solar que suele haber en cada zona.

En la siguiente tabla se muestran los resultados anuales de Temperatura a 2 m sobre el suelo obtenidos de las 20 ubicaciones analizadas en unidades de “°C”:

POWER NASA						
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ampara	27.129	26.923	27.186	27.091	27.506	27.067
Antsiranana	26.257	26.012	25.843	26.122	26.113	26.209
Asmara	22.019	22.214	22.420	22.322	21.613	22.255
Bangkok	28.019	26.920	28.301	27.734	28.045	28.362
Berlín	7.152	9.152	8.808	8.699	10.388	10.012
Budapest	9.789	11.033	11.532	11.057	11.940	11.744
Cà Mau	28.121	27.207	27.575	27.596	27.726	27.850
Dublín	8.897	10.041	9.524	9.409	10.245	9.565
El Cairo	23.269	21.415	21.832	22.019	22.303	22.096
Fyn	7.229	8.860	8.339	8.469	10.109	9.305
Hyderabad	26.167	25.828	26.219	25.413	25.874	26.627
Maseru	15.803	14.393	15.217	15.349	15.368	16.569
Merbok	27.721	27.303	27.439	27.512	27.676	27.667
Montevideo	16.999	17.003	17.512	17.127	17.144	17.680
Ometepe	27.394	27.183	27.503	27.563	27.563	28.355
Santos	20.915	20.766	21.567	20.977	22.134	22.155
Steinkjer	2.298	5.580	3.463	4.421	5.391	5.262
Tshela	24.841	24.424	24.690	24.650	24.678	25.295
Ujué	10.715	12.428	11.680	10.997	12.320	12.124
Vaasa	2.488	4.846	3.741	4.786	5.354	5.659

Tabla 5 Recopilación de resultados de temperatura anual promedio en las 20 ubicaciones analizadas (°C) en NASA POWER.

En la siguiente tabla se muestran los resultados anuales de velocidad de viento a una altura de 10 m sobre el suelo obtenidos de las 20 ubicaciones analizadas en unidades de “m/s”:

POWER NASA						
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ampara	3.335	3.439	3.409	3.595	3.600	3.419
Antsiranana	7.164	6.405	6.706	7.012	6.816	7.007
Asmara	3.636	3.820	3.902	3.672	3.398	3.710
Bangkok	2.961	3.124	2.832	2.983	3.081	3.072
Berlín	4.365	4.670	4.567	4.426	4.411	4.771
Budapest	3.617	3.377	3.748	3.621	3.493	3.577
Cà Mau	4.097	4.742	4.447	4.402	4.135	4.481
Dublín	5.325	6.131	6.002	6.043	5.957	6.366

El Cairo	3.954	3.829	3.884	3.984	3.705	3.983
Fyn	5.623	6.112	5.982	5.833	5.972	6.346
Hyderabad	3.682	3.978	3.897	4.051	3.772	3.766
Maseru	3.419	3.317	3.548	3.510	3.345	3.539
Merbok	2.475	2.526	2.443	2.623	2.540	2.317
Montevideo	4.807	4.994	4.757	4.826	4.729	4.710
Ometepe	5.004	5.093	5.748	5.295	5.295	6.252
Santos	3.698	3.541	3.573	3.685	3.594	3.423
Steinkjer	3.116	3.508	3.444	3.235	3.506	3.624
Tshela	1.014	1.000	1.007	0.988	1.016	1.054
Ujué	3.548	3.319	3.397	3.556	3.482	3.380
Vaasa	3.457	3.735	3.799	3.750	3.730	4.012

Tabla 6 Recopilación de resultados de velocidad de viento promedio en las 20 ubicaciones analizadas (m/s) en NASA POWER.

10. Comparativa y resultados de los datasets de PVGIS

Los datos de las 20 localidades se descargaron desde PVGIS. De PVGIS se obtuvieron datos horarios para el periodo 2010-2015 de irradiancia, temperatura y viento. Estos resultados fueron generados a partir de los distintos datasets que se incluyen en PVGIS, de reanálisis y de observaciones satelitales, como son, CMSAF, SARA, COSMO, ERA5 o NSRDB.

Por tanto, se van a hacer comparativas entre los distintos años y datasets. Para llevar a cabo las distintas comparativas se calcularán coeficientes de correlación para las distintas series temporales, se determinarán los valores medios de los distintos meses, de los trimestres y años. Las series de viento y temperatura provienen de un único dataset proveniente de ECMWF.

En la siguiente tabla se muestran los resultados anuales de irradiación obtenidos de las 20 ubicaciones analizadas en unidades de “kWh/m²/año”:

		PVGis					
		2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ampara	SARA	2080	2058	2147	2073	2100	2108
Antsiranana	SARA	2279	2232	2205	2281	2212	2225
	CMSAF	2371	2335	2330	2406	2356	2357
Asmara	SARA	2177	2221	2238	2206	2178	2224
	CMSAF	2214	2257	2282	2302	2232	2303
Bangkok	SARA	1909	1842	1889	1901	1985	1985
Berlín	CMSAF	1059	1154	1143	1070	1117	1166
	COSMO	1004	1046	1027	1024	1032	1054
	ERA5	1036	1095	1082	1043	1090	1113

	SARAH	1042	1136	1077	995	1082	1123
Budapest	CMSAF	1105	1238	1295	1165	1129	1200
	COSMO	1114	1238	1274	1170	1126	1198
	ERA5	1201	1308	1344	1237	1211	1248
	SARAH	1191	1336	1369	1226	1230	1293
Cà Mau	SARAH	1845	1791	1816	1770	1870	1946
Dublín	CMSAF	1102	1104	1068	1103	1086	1136
	COSMO	1039	1025	926	1014	1004	1073
	ERA5	1056	1015	994	1058	1028	1045
	SARAH	1026	1023	939	980	986	1031
El Cairo	CMSAF	2109	2111	2103	2142	2114	2084
	ERA5	2160	2099	2133	2159	2121	2108
	SARAH	2219	2202	2188	2201	2183	2157
Fyn	CMSAF	1013	1046	1063	1118	1134	1103
	COSMO	991	948	977	1045	986	994
	ERA5	1101	1100	1118	1131	1123	1130
	SARAH	996	1019	990	988	1051	1010
Hyderabad	SARAH	1983	2116	2103	2037	2098	2125
Maseru	CMSAF	1963	1973	2006	2098	2062	2137
	SARAH	1995	1986	1994	2053	2034	2101
Merbok	SARAH	1973	1935	1984	1931	2004	2023
Montevideo	SARAH	1648	1716	1604	1634	1546	1627
Ometepe	NSRDB	1978	1951	1909	1964	1997	2032
Santos	NSRDB	1537	1516	1613	1492	1678	1529
Steinkjer	COSMO	731	728	751	763	821	712
	ERA5	778	762	778	807	858	752
Tshala	CMSAF	1553	1512	1578	1588	1556	1554
	SARAH	2177	1583	1586	1540	1598	1575
Ujué	CMSAF	1592	1662	1681	1555	1581	1634
	COSMO	1472	1486	1537	1438	1469	1499
	ERA5	1489	1516	1549	1457	1485	1519
	SARAH	1592	1670	1660	1520	1578	1623
Vaasa	COSMO	897	884	815	897	913	854
	ERA5	945	939	904	980	964	921

Tabla 7 Recopilación de resultados de irradiación anual en las 20 ubicaciones analizadas (kWh/m²/año) en PVGIS.

Los resultados de temperatura promedio anual en unidades de “°C” se muestran a continuación.

PVGis						
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ampara	27.129	26.923	27.186	27.091	27.506	27.067
Antsiranana	26.257	26.012	25.843	26.122	26.113	26.209
Asmara	22.019	22.214	22.420	22.322	21.613	22.255
Bangkok	28.019	26.920	28.301	27.734	28.045	28.362
Berlín	7.152	9.152	8.808	8.699	10.388	10.012
Budapest	9.789	11.033	11.532	11.057	11.940	11.744
Cà Mau	28.121	27.207	27.575	27.596	27.726	27.850
Dublín	8.897	10.041	9.524	9.409	10.245	9.565
El Cairo	23.269	21.415	21.832	22.019	22.303	22.096
Fyn	7.229	8.860	8.339	8.469	10.109	9.305
Hyderabad	26.167	25.828	26.219	25.413	25.874	26.627
Maseru	15.803	14.393	15.217	15.349	15.368	16.569
Merbok	27.721	27.303	27.439	27.512	27.676	27.667
Montevideo	16.999	17.003	17.512	17.127	17.144	17.680
Ometepe	27.394	27.183	27.503	27.563	27.563	28.355
Santos	20.915	20.766	21.567	20.977	22.134	22.155
Steinkjer	2.298	5.580	3.463	4.421	5.391	5.262
Tshela	24.841	24.424	24.690	24.650	24.678	25.295
Ujué	10.715	12.428	11.680	10.997	12.320	12.124
Vaasa	2.488	4.846	3.741	4.786	5.354	5.659

Tabla 8 Recopilación de resultados de temperatura anual promedio en las 20 ubicaciones analizadas (°C) en PVGis. En la siguiente tabla se muestran los resultados anuales de velocidad de viento a una altura de 10 m sobre el suelo obtenidos de las 20 ubicaciones analizadas en unidades de “m/s”:

PVGis						
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ampara	2.255	2.343	2.164	2.227	2.088	2.034
Antsiranana	4.751	4.279	4.247	4.271	3.974	4.236
Asmara	2.396	2.414	2.360	2.410	2.159	2.316
Bangkok	3.059	3.035	2.747	2.810	2.975	3.026
Berlín	4.189	4.237	3.785	3.688	3.602	3.943
Budapest	3.347	3.052	3.075	2.894	2.737	2.840
Cà Mau	3.303	3.734	3.240	3.173	2.881	3.232

Dublín	4.584	5.204	4.545	4.580	4.332	4.645
El Cairo	3.571	3.452	3.338	3.352	3.128	3.361
Fyn	4.772	5.063	4.505	4.374	4.382	4.677
Hyderabad	3.444	3.633	3.333	3.511	3.336	3.133
Maseru	2.766	2.758	2.514	2.502	2.314	2.610
Merbok	1.643	1.687	1.428	1.462	1.498	1.418
Montevideo	6.336	6.591	6.158	6.271	6.160	6.154
Ometepe	6.178	6.320	7.002	6.828	7.082	8.043
Santos	3.759	3.510	3.396	3.671	3.400	3.532
Steinkjer	3.107	3.411	3.155	2.988	3.011	2.988
Tshela	1.748	1.692	1.592	1.588	1.631	1.515
Ujué	4.092	3.898	3.746	3.786	3.451	3.563
Vaasa	3.556	3.725	3.378	3.401	3.234	3.569

Tabla 9 Recopilación de resultados de velocidad de viento promedio en las 20 ubicaciones analizadas (m/s) en PVGIS.

En el siguiente apartado se realiza una comparativa de los datos de irradiación de los datasets en PVGIS. Solamente se hará una comparativa de este parámetro debido a que los datos de temperatura y viento son obtenidos de la misma fuente que es el dataset de ECMWF, como ya se comentó con anterioridad al explicar la metodología de esta fuente.

10.1 Comparativa de los datos de Irradiancia

Para las siguientes comparativas se ha elegido a la ciudad de Berlín como ejemplo por la única razón que tiene disponible varios datasets entre los que se encuentran datasets basados en reanálisis y satelitales.

Berlín cuenta con cuatro datasets PVGIS-CMSAF, PVGIS-COSMO, PVGIS-ERA5 y PVGIS-SARAH para la irradiancia, los cuales son comunes para la mayoría de los países europeos.

Han sido calculados los coeficientes de correlación entre los distintos datasets descargados para el período 2010-2015 y se muestran en la siguiente tabla. Las correlaciones de viento y temperatura no han sido incluidas en este apartado por que PVGIS obtiene estos datos de una única fuente, como explicamos en el apartado de Metodología de PVGIS.

En la siguiente tabla se puede comprobar cómo es ERA5 el dataset de reanálisis que mejor se aproxima a los datasets satelitales.

	CMSAF	SARAH	COSMO	ERA5
CMSAF	-	-	-	-
SARAH	0.93845260	-	-	-
COSMO	0.90152767	0.93654052	-	-
ERA5	0.94084343	0.94032933	0.93473593	-

Tabla 10 Coeficientes de correlación entre los datasets de PVGIS.

En los siguientes diagramas de barras se muestran los valores medios anual, trimestral y mensual para la irradiancia:

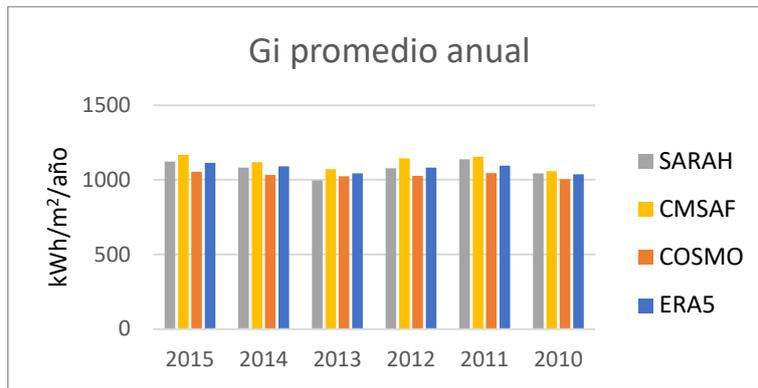


Ilustración 6 Irradiación anual en el período 2010 a 2015 entre los datasets disponibles para Berlín.

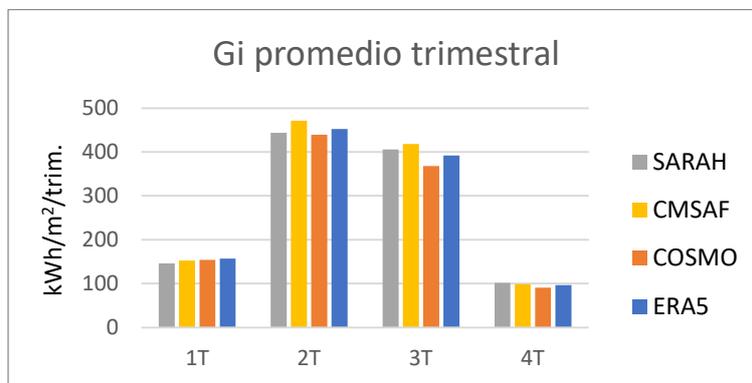


Ilustración 7 Irradiación trimestral promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets disponibles para Berlín.

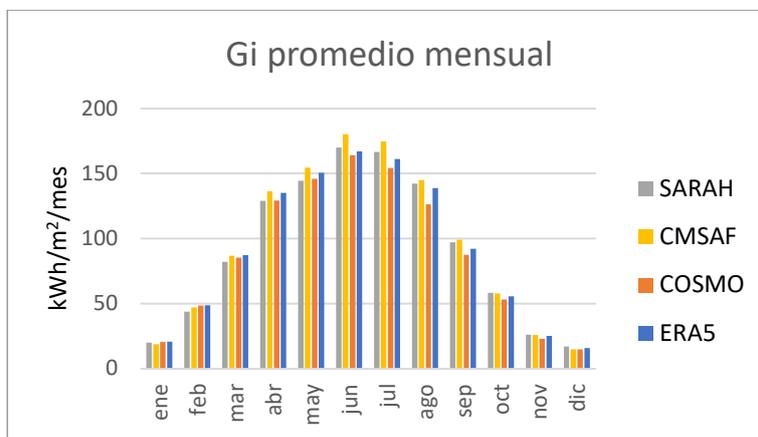


Ilustración 8 Irradiación mensual promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets disponibles para Berlín.

11. Comparativa y resultados de los datasets de Renewables.ninja

Tras descargar los datos horarios de irradiancia, temperatura y viento de las 20 localizaciones, fue necesario procesar los datos utilizando hojas Excel y convertir los datos horarios en valores más representativos, es decir, diarios, mensuales, trimestrales y anuales.

En la siguiente tabla se muestran los resultados anuales de irradiación obtenidos de las 20 ubicaciones analizadas en unidades de “kWh/m²/año”:

Renewables.ninja							
	Dataset	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ampara	MERRA-2	1549	1501	1619	1559	1562	1530
Antsiranana	MERRA-2	1942	1923	1869	1909	1899	1907
Asmara	MERRA-2	1893	1941	1949	1956	1957	1987
Bangkok	MERRA-2	1485	1511	1488	1549	1573	1603
Berlín	MERRA-2	1057	1118	1083	1080	1077	1107
	SARAH	997	1098	1065	1012	1082	1124
Budapest	MERRA-2	1198	1295	1306	1214	1184	1232
	SARAH	1166	1319	1369	1245	1246	1314
Cà Mau	MERRA-2	1460	1461	1415	1412	1514	1553
Dublín	MERRA-2	1142	1111	1057	1129	1093	1106
	SARAH	921	899	861	917	913	954
El Cairo	MERRA-2	1903	1930	1908	1941	1910	1888
	SARAH	1866	1889	1876	1895	1881	1874
Fyn	MERRA-2	1011	1021	1007	1068	1022	1033
	SARAH	959	987	994	1008	1060	1029
Hyderabad	MERRA-2	1665	1747	1757	1721	1759	1760
Maseru	MERRA-2	1960	1992	2005	2049	2004	2009
Merbok	MERRA-2	1447	1501	1421	1440	1495	1518
Montevideo	MERRA-2	1722	1746	1667	1734	1645	1665
Ometepe	MERRA-2	1663	1665	1691	1666	1767	1753
Santos	MERRA-2	1644	1673	1692	1678	1741	1591
Steinkjer	MERRA-2	820	786	818	818	868	790
	SARAH	645	656	659	698	734	664
Tshela	MERRA-2	1554	1502	1504	1510	1526	1563
Ujué	MERRA-2	1439	1479	1468	1417	1416	1463
	SARAH	1567	1630	1644	1522	1570	1629
Vaasa	MERRA-2	937	945	902	973	955	907
	SARAH	805	806	752	851	861	820

Tabla 11 Recopilación de resultados de irradiación anual en las 20 ubicaciones analizadas (kWh/m²/año) en Renewables.ninja.

Tras observar estos resultados se puede decir que los datos de MERRA-2 y SARAH en renewables.ninja son muy próximos, como norma general en MERRA-2 se ven valores superiores de irradiancia, a excepción de la ubicación de Ujué en donde es SARAH la cual muestra valores mayores de irradiancia.

Los resultados de temperatura promedio anual en unidades de “°C” se muestran a continuación.

Renewables.ninja							
	Dataset	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ampara	MERRA-2	26.884	26.694	27.022	26.864	27.307	26.817
Antsiranana	MERRA-2	26.101	25.855	25.577	25.976	25.957	26.050
Asmara	MERRA-2	23.538	23.550	23.852	23.720	23.149	23.667
Bangkok	MERRA-2	28.191	27.058	28.368	27.886	28.207	28.527
Berlín	MERRA-2	7.328	9.392	9.130	8.954	10.602	10.306
Budapest	MERRA-2	9.435	10.683	11.392	10.663	11.649	11.468
Cà Mau	MERRA-2	28.197	27.280	27.555	27.662	27.791	27.915
Dublín	MERRA-2	8.976	10.099	9.595	9.487	10.312	9.631
El Cairo	MERRA-2	23.154	21.224	21.825	21.853	22.171	21.958
Fyn	MERRA-2	7.276	8.917	8.382	8.549	10.166	9.357
Hyderabad	MERRA-2	26.269	25.939	26.427	25.502	26.024	26.830
Maseru	MERRA-2	15.352	13.880	14.670	14.802	14.875	16.113
Merbok	MERRA-2	27.158	26.736	26.872	26.949	27.113	27.132
Montevideo	MERRA-2	17.124	17.101	17.485	17.231	17.240	17.814
Ometepe	MERRA-2	27.647	27.492	27.721	27.769	27.919	28.446
Santos	MERRA-2	21.730	21.491	22.248	21.721	22.720	22.839
Steinkjer	MERRA-2	1.465	5.046	2.935	3.766	4.837	4.625
Tshela	MERRA-2	24.808	24.377	24.492	24.552	24.565	25.217
Ujué	MERRA-2	10.926	12.599	11.993	11.087	12.528	12.484
Vaasa	MERRA-2	2.685	5.091	3.919	4.891	5.430	5.796

Tabla 12 Recopilación de resultados de temperatura promedio anual en las 20 ubicaciones analizadas (°C) en Renewables.ninja.

Los resultados para la velocidad del viento promedio anual se muestran a continuación en unidades de “m/s”:

Renewables.ninja							
	Dataset	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ampara	MERRA-2	3.411	3.476	3.501	3.647	3.649	3.404
Antsiranana	MERRA-2	7.073	6.328	6.728	6.954	6.744	6.940
Asmara	MERRA-2	3.621	3.707	3.743	3.588	3.408	3.648
Bangkok	MERRA-2	3.115	3.263	3.036	3.133	3.211	3.206
Berlín	MERRA-2	4.442	4.607	4.561	4.467	4.444	4.678
Budapest	MERRA-2	4.697	4.498	4.831	4.692	4.599	4.663
Cà Mau	MERRA-2	4.256	4.945	4.809	4.631	4.282	4.666
Dublín	MERRA-2	6.320	6.941	6.852	6.894	6.806	7.191

El Cairo	MERRA-2	5.489	5.374	5.392	5.501	5.252	5.491
Fyn	MERRA-2	5.709	6.001	5.954	5.834	5.917	6.182
Hyderabad	MERRA-2	3.826	4.044	4.046	4.186	3.874	3.888
Maseru	MERRA-2	3.431	3.330	3.538	3.487	3.332	3.525
Merbok	MERRA-2	1.731	1.765	1.728	1.824	1.767	1.614
Montevideo	MERRA-2	4.935	5.130	4.913	4.977	4.867	4.837
Ometepe	MERRA-2	5.075	5.175	5.630	5.309	5.941	6.206
Santos	MERRA-2	3.932	3.776	3.737	3.925	3.763	3.676
Steinkjer	MERRA-2	3.029	3.225	3.190	3.099	3.242	3.252
Tshela	MERRA-2	-1.241	-1.226	-1.200	-1.162	-1.210	-1.149
Ujué	MERRA-2	4.731	4.584	4.635	4.745	4.689	4.617
Vaasa	MERRA-2	3.675	3.819	3.831	3.828	3.813	3.992

Tabla 13 Recopilación de resultados de viento promedio anual en las 20 ubicaciones analizadas (m/s) en Renewables.ninja.

Es interesante conocer la correlación que existe entre los datos de obtenidos de los distintos datasets, en el caso de Renewables.ninja solo haremos una correlación de la irradiancia de MERRA-2 con la de SARAH, ya que como comentamos anteriormente la temperatura y el viento se obtienen de un mismo dataset, MERRA2.

Llama la atención que los resultados de viento para la ubicación de Tshela en la R.D. Congo sean negativos, lo cual muestra deficiencias en el reanálisis de MERRA-2 en esa ubicación.

11.1 Comparativa de los datos de Irradiancia

Tomaremos como ejemplo para este análisis a la ciudad de Berlín porque en la plataforma PVGIS cuenta con datos de 4 datasets distintos y en Renewables.ninja de 2 datasets distintos.

Se ha calculado el coeficiente de correlación lineal entre las series temporales de MERRA2 y SARAH para la variable de irradiancia, obteniendo una correlación de 0.92176.

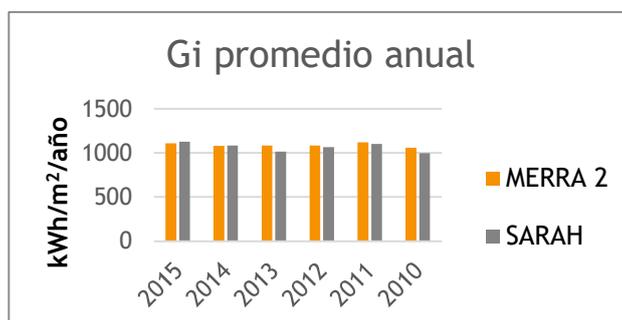


Ilustración 9 Irradiación anual en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Renewables.ninja para Berlín.

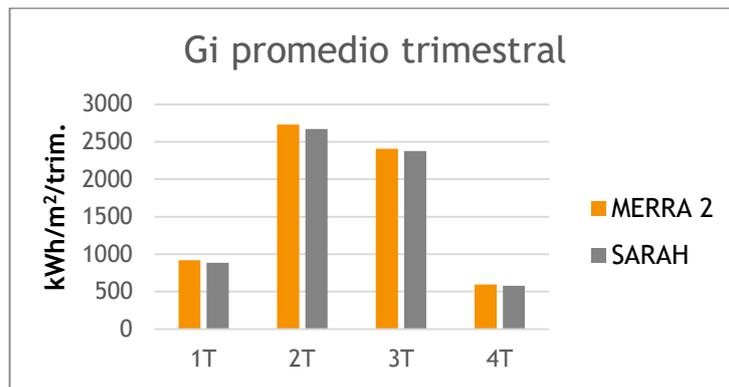


Ilustración 10 Irradiación trimestral promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Renewables.ninja para Berlín.

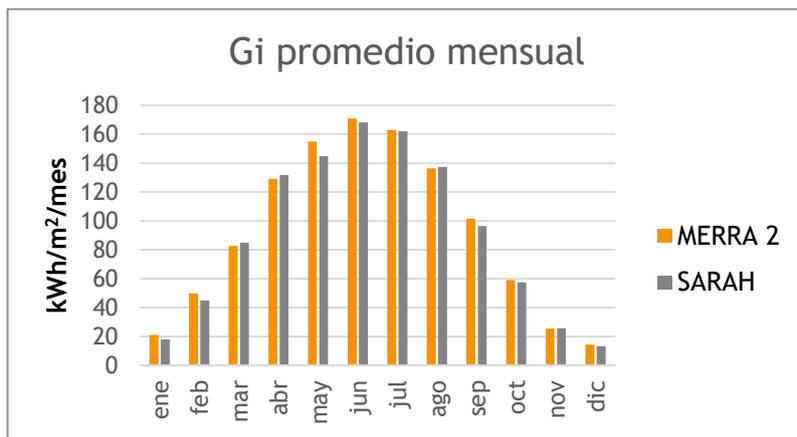


Ilustración 11 Irradiación mensual promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Renewables.ninja para Berlín.

12. Análisis de los resultados de las distintas fuentes de datos

12.1 NASA POWER y Renewables.ninja

Los datos de irradiancia entre NASA POWER y Renewables.ninja son muy similares. Hay ubicaciones en donde la diferencia es significativa como es el caso de Ampara, Antsiranana, Asmara, Hyderabad, Merbok, Bangkok o Cà Mau, en donde se pueden observar diferencias de más de 500 kWh/m²/año como es el caso de Bangkok. Todas ellas tienen en común su proximidad al Océano Índico. Esto podría significar un indicio de que el reanálisis de MERRA-2 pierde fidelidad zonas de África del este y Asia del Sur.

Por otra parte, los datos de temperatura y viento son muy cercanos, esto puede deberse a que ambas fuentes de datos están basadas en el reanálisis de MERRA-2.

En la siguiente tabla se recogen las diferencias entre el dataset de NASA POWER con los datasets correspondientes en Renewables.ninja.

		POWER - Ren.ninja					
		2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ampara	MERRA-2	249	312	227	202	214	260
Antsiranana	MERRA-2	200	185	214	258	185	209

Asmara	MERRA-2	377	367	324	249	214	248
Bangkok	MERRA-2	518	432	449	289	365	327
Berlín	MERRA-2	14	39	29	-159	-112	-124
	SARAH	74	59	47	-91	-117	-141
Budapest	MERRA-2	41	81	89	-49	-43	-24
	SARAH	73	57	27	-80	-104	-106
Cà Mau	MERRA-2	330	302	319	305	294	337
Dublin	MERRA-2	-76	-91	-39	-132	-134	-123
	SARAH	145	121	156	80	46	29
El Cairo	MERRA-2	255	185	211	150	162	138
	SARAH	292	226	244	196	191	153
Fyn	MERRA-2	117	126	118	-17	29	-11
	SARAH	169	160	130	44	-9	-7
Hyderabad	MERRA-2	289	319	245	138	173	176
Maseru	MERRA-2	-13	-66	-56	-30	-17	25
Merbok	MERRA-2	311	213	301	254	245	254
Montevideo	MERRA-2	20	34	32	36	29	64
Ometepe	MERRA-2	277	270	241	241	167	236
Santos	MERRA-2	27	-20	22	-135	-11	-42
Steinkjer	MERRA-2	-17	-2	-46	-108	-80	-59
	SARAH	158	128	113	12	54	68
Tshela	MERRA-2	107	124	58	-50	-100	-120
Ujué	MERRA-2	71	95	107	50	79	71
	SARAH	-57	-56	-69	-55	-75	-96
Vaasa	MERRA-2	16	26	37	-77	-26	-33
	SARAH	147	165	187	45	68	54

Tabla 14 Recopilación de las diferencias entre NASA POWER y los datasets de Renewables.ninja.

Puede observarse que por lo general en el dataset de NASA POWER las estimaciones de irradiancia son más optimistas, ya que la diferencia da un valor positivo.

12.2 NASA POWER y PVGIS

En esta segunda comparativa se puede ver que el sesgo en los datos de irradiación, en las ubicaciones próximas al mar Índico, también está presente.

Si en la comparativa anterior en Ometepe se podía apreciar un sesgo positivo en los datos de NASA POWER, esta vez los valores son muy cercanos. Puede observarse que, al realizar la diferencia entre los valores de ambas fuentes, nos da como

resultados valores negativos, lo que sugiere que las estimaciones de PVGIS son más optimistas que las de NASA POWER.

Los datos de temperatura y viento son muy cercanos, como podrá comprobarse en el Anexo 1.

NASA POWER - PVGIS							
		2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ampara	SARAH	-282	-261	-349	-276	-302	-311
Antsiranana	SARAH	-138	-90	-64	-140	-71	-84
	CMSAF	-230	-194	-189	-265	-214	-216
Asmara	SARAH	93	49	32	64	92	46
	CMSAF	56	13	-12	-32	38	-33
Bangkok	SARAH	95	161	115	102	18	18
Berlín	CMSAF	12	-83	-72	0	-47	-95
	COSMO	67	25	44	47	39	17
	ERA5	35	-24	-11	27	-20	-42
	SARAH	29	-66	-6	76	-11	-52
Budapest	CMSAF	134	1	-56	74	110	39
	COSMO	125	1	-35	69	113	41
	ERA5	38	-69	-105	2	28	-9
	SARAH	48	-97	-130	13	9	-54
Cà Mau	SARAH	-54	-1	-25	20	-80	-156
Dublin	CMSAF	-37	-38	-3	-38	-21	-70
	COSMO	26	41	140	51	62	-8
	ERA5	10	51	71	8	37	20
	SARAH	39	43	126	85	80	34
El Cairo	CMSAF	49	47	55	16	44	74
	ERA5	-2	59	24	-1	37	49
	SARAH	-61	-44	-30	-43	-25	1
Fyn	CMSAF	116	83	66	10	-5	25
	COSMO	137	180	152	83	143	135
	ERA5	27	28	10	-3	5	-1
	SARAH	132	110	138	140	78	119
Hyderabad	SARAH	-29	-161	-148	-83	-144	-170
Maseru	CMSAF	-16	-26	-59	-151	-115	-190
	SARAH	-48	-39	-47	-106	-87	-154
Merbok	SARAH	-215	-177	-226	-173	-246	-265
Montevideo	SARAH	94	64	96	137	127	102

Ometepe	NSRDB	-39	-16	23	-57	-63	-43
Santos	NSRDB	133	137	101	50	52	20
Steinkjer	COSMO	71	75	52	39	-18	91
	ERA5	25	41	25	-4	-55	50
Tshala	CMSAF	108	149	83	73	105	107
	SARAH	19	78	75	121	63	86
Ujué	CMSAF	-82	-152	-170	-45	-71	-124
	COSMO	38	25	-27	72	42	11
	ERA5	21	-5	-38	53	25	-9
	SARAH	-82	-160	-149	-10	-67	-113
Vaasa	COSMO	56	68	138	56	40	98
	ERA5	8	13	48	-27	-12	31

Tabla 15 Recopilación de las diferencias entre NASA POWER y los datasets de PVGIS.

13. Comparativa de NASA POWER con PVGIS en Berlín.

A continuación, se presenta una comparativa más en detalle de los resultados obtenidos de NASA POWER y PVGIS, específicos para la ciudad de Berlín. Como se expuso anteriormente, el dataset basado en reanálisis ERA5, es el que mejor se aproxima a los datasets satelitales, es por este motivo que se hará a continuación una comparativa entre el dataset de NASA POWER con ERA5.

En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de correlación entre las series de PVGIS-ERA5 y NASA POWER-GEWEX/CERES para la ciudad de Berlín:

Gi	T2m	WS10m
0.95720237	0.99648337	0.99633123

Tabla 16 Coeficientes de correlación calculados entre las series de irradiación diaria entre PVGIS-ERA5 y NASA POWER.

La correlación entre la temperatura, T2m, y el viento, WS10m es bastante alta. Por parte de PVGIS, este obtiene los datos de temperatura y viento de los pronósticos de ECMWF, y NASA POWER los obtiene del dataset MERRA-2. Al ser dos fuentes independientes con resultados similares es una pista de la exactitud con la que son capaces de predecir el estado del clima en cuanto a temperatura y viento. En el apartado dedicado a la localización de Ujué se hará una comparativa entre NASA POWER y resultados reales obtenidos en una estación meteorológica situada en Navarra, España.

En los siguientes diagramas se muestran los valores medios de las tres variables de estudio descargados de NASA POWER y PVGIS-ERA5 para la ciudad de Berlín.

13.1 Comparativa de los datos de Irradiancia

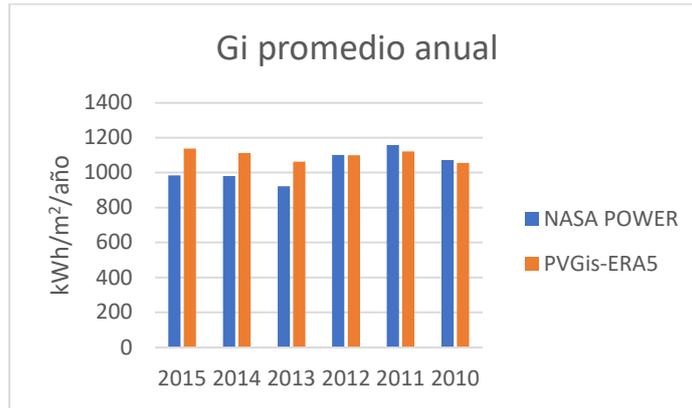


Ilustración 12 Irradiación anual en el período 2010 a 2015 entre los datasets de PVGIS-ERA5 y NASA POWER para Berlín.

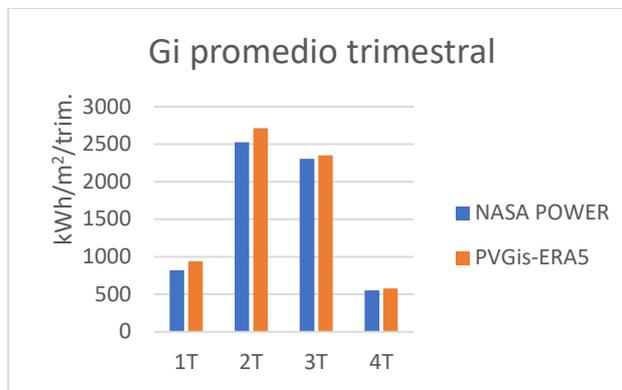


Ilustración 13 Irradiación trimestral promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de PVGIS-ERA5 y NASA POWER para Berlín.

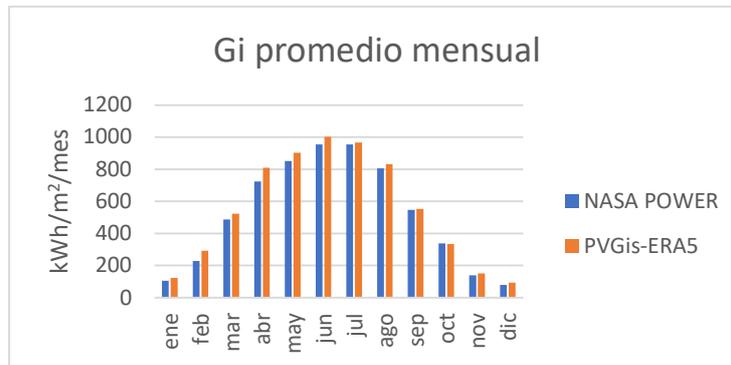


Ilustración 14 Irradiación mensual promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de PVGIS-ERA5 y NASA POWER para Berlín.

13.2 Comparativa de los datos de Temperatura

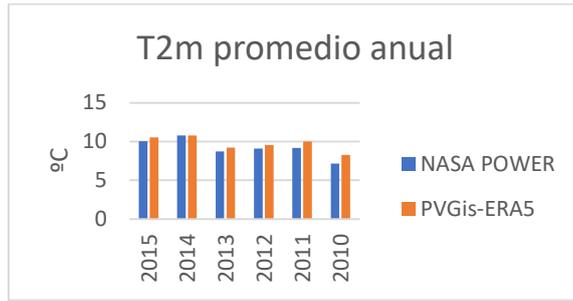


Ilustración 15 Temperatura anual promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de PVGIS-ERA5 y NASA POWER para Berlín.

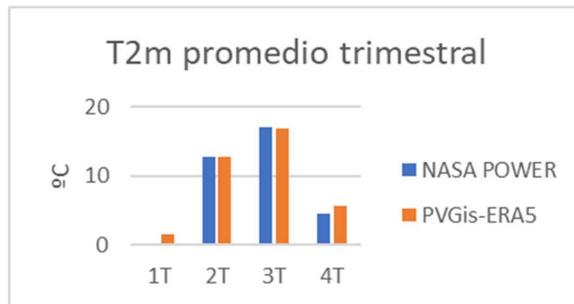


Ilustración 16 Temperatura trimestral promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de PVGIS-ERA5 y NASA POWER para Berlín.

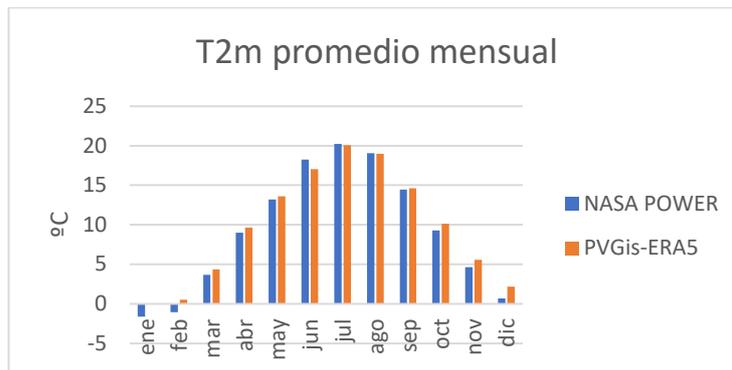


Ilustración 17 Temperatura mensual promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de PVGIS-ERA5 y NASA POWER para Berlín.

13.3 Comparativa de los datos de Viento

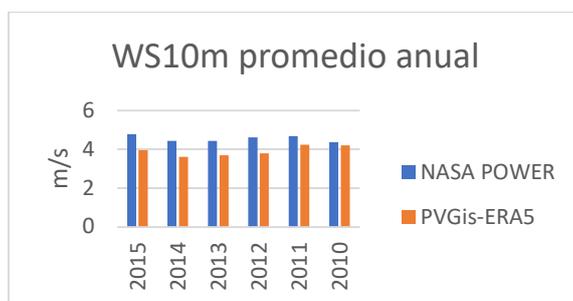


Ilustración 18 Velocidad del viento anual promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de PVGIS-ERA5 y NASA POWER para Berlín.

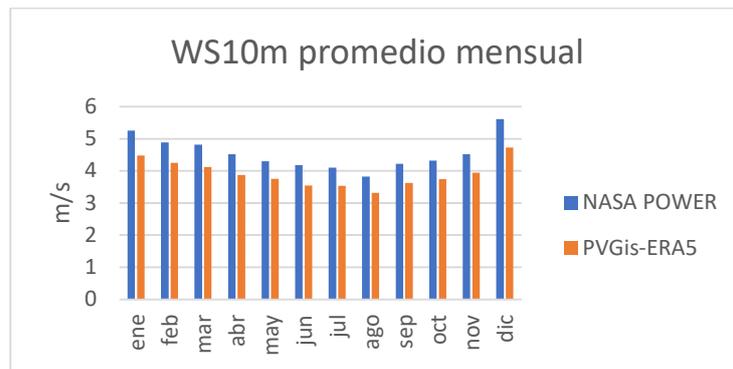


Ilustración 19 Velocidad del viento mensual promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de PVGIS-ERA5 y NASA POWER para Berlín.

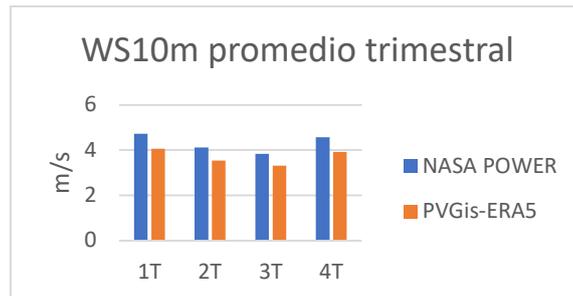


Ilustración 20 Velocidad del viento trimestral promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de PVGIS-ERA5 y NASA POWER para Berlín.

14. Comparativa de NASA POWER con Renewables.ninja en Berlín

El objetivo de este apartado ha sido comparar el dataset de Renewables.ninja con los de NASA POWER y representar los valores promedios de las tres variables en la ciudad de Berlín.

Como se comentó en apartados anteriores, tanto Renewables.ninja como NASA POWER obtienen los datos de temperatura y viento, fundamentalmente, del dataset de reanálisis MERRA-2. Sería de esperar que ambas variables fueran idénticas, sin embargo, en la siguiente tabla se puede observar que no es así.

Existe una correlación muy alta en la variable temperatura, que podría considerarse que se trata de la misma serie de datos, MERRa-2. Por otro lado, en la variable de viento se puede ver como existe cierta discordancia entre las dos series. Esto puede ser debido a los tratamientos que realiza Renewables.ninja sobre el dataset para extrapolar los datos a distintas alturas de viento.

Gi	T2m	WS10m
0.92758407	0.99978485	0.98650879

Tabla 17 Coeficientes de correlación calculados entre las series de irradiación diaria entre los datos de Renewables.ninja y NASA POWER para Berlín.

En los siguientes diagramas se muestran los valores medios de ambos datasets para la ciudad de Berlín.

14.1 Comparativa de los datos de Irradiancia

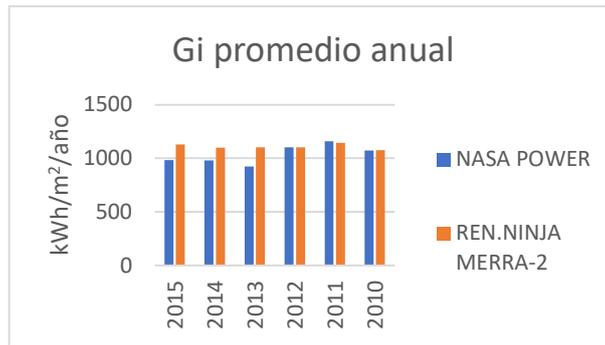


Ilustración 21 Irradiación anual en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Ren.ninja-MERRA-2 y NASA POWER para Berlín.

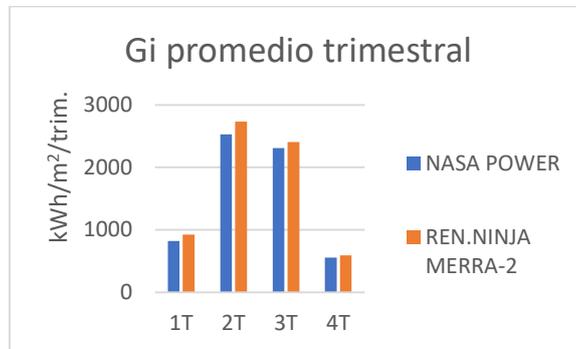


Ilustración 22 Irradiación trimestral promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Ren.ninja-MERRA-2 y NASA POWER para Berlín.

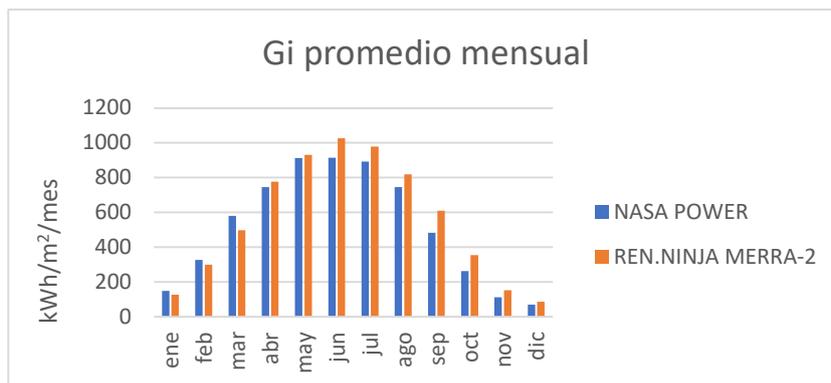


Ilustración 23 Irradiación mensual promedio en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Ren.ninja-MERRA-2 y NASA POWER para Berlín.

14.2 Comparativa de los datos de Temperatura

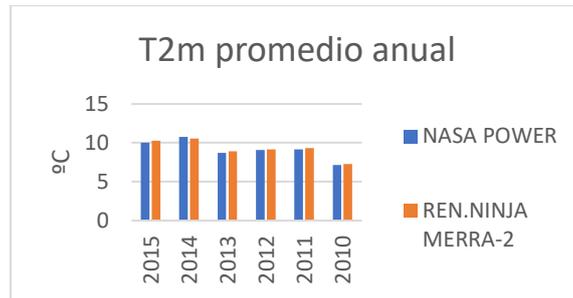


Ilustración 24 Temperatura promedio anual en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Ren.ninja-MERRA-2 y NASA POWER para Berlín.

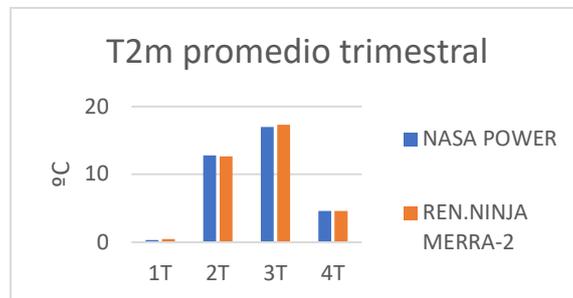


Ilustración 25 Temperatura promedio trimestral en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Ren.ninja-MERRA-2 y NASA POWER para Berlín.

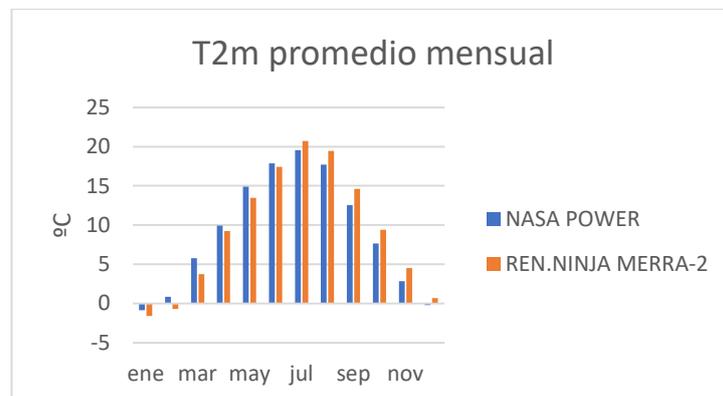


Ilustración 26 Temperatura promedio mensual en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Ren.ninja-MERRA-2 y NASA POWER para Berlín.

14.3 Comparativa de los datos de Viento

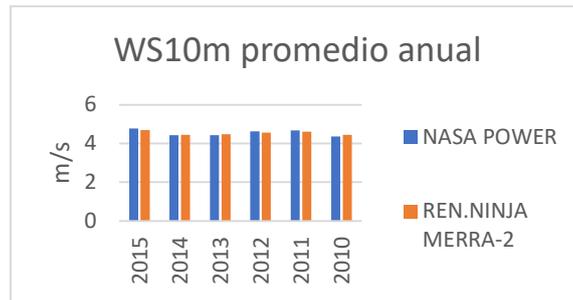


Ilustración 27 Velocidad de viento promedio anual en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Ren.ninja-MERRA-2 y NASA POWER para Berlín.

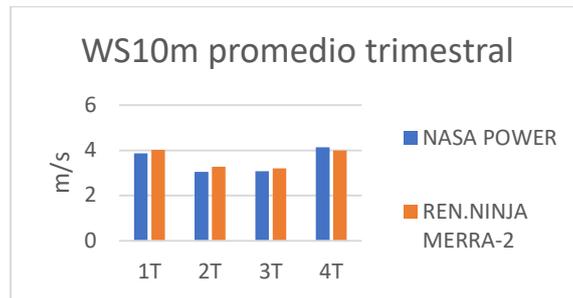


Ilustración 28 Velocidad de viento promedio trimestral en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Ren.ninja-MERRA-2 y NASA POWER para Berlín.



Ilustración 29 Velocidad de viento promedio mensual en el período 2010 a 2015 entre los datasets de Ren.ninja-MERRA-2 y NASA POWER para Berlín.

15. Comparativa de datos reales

Los datos reales fueron obtenidos de la web propiedad del Gobierno de Navarra “meteo.navarra.es”, que pone a disposición del público una gran cantidad de resultado de mediciones obtenidas por las estaciones meteorológicas terrestres en la comunidad de Navarra.

Para este trabajo se descargaron los datos de la estación de Ujué situada en las coordenadas: lat: 42.512744436, long: -1.5097369. Este portal permite descargarlos datos de un periodo no mayor a un año, de forma que la única fuente de entre las anteriores que ofrece datos para ese período es NASA POWER.

El período del que se descargaron los datos de ambas fuentes ha sido diciembre de 2019 a diciembre de 2020, en total 13 meses. La herramienta que tiene datos disponibles al público

general en este periodo de 13 meses es NASA POWER, por tanto, la comparativa se realizará entre los datasets de NASA POWER con las mediciones en campo en Ujué, Navarra. Cabe destacar que la temperatura y el viento descargado de NASA POWER proviene del dataset de reanálisis de MERRA-2, por otra parte, la irradiación proviene de observaciones satelitales.

En la siguiente tabla se muestran los resultados que se obtuvieron de coeficiente de correlación de las tres variables de estudio:

Gi	T2m	WS10m
0.97447503	0.9729822	0.50523296

Tabla 18 Coeficientes de correlación calculados entre las series de irradiación diaria entre los datos de “meteo.navarra.es” y NASA POWER para Ujué.

Se puede observar que la correlación con los datos de irradiación y temperatura es alta, sin embargo, hay que destacar que entre los datos de viento existe un sesgo importante.

15.1 Comparativa de los datos de Irradiancia

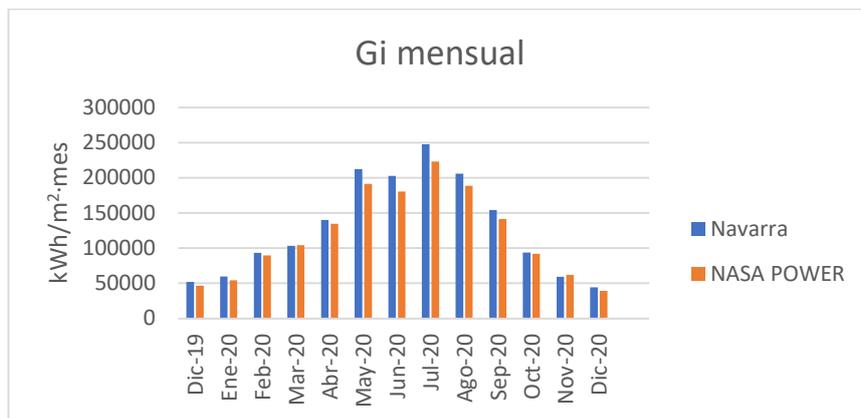


Ilustración 30 Irradiación mensual en el período de Diciembre 2019 a Diciembre 2020 entre los datasets de “meteo.navarra.es” y NASA POWER para Ujué.

Puede verse en este gráfico que la predicción satelital de NASA POWER estaba ligeramente por debajo de lo que se llegó a medir en la estación meteorológica de Ujué.

15.2 Comparativa de los datos de Temperatura

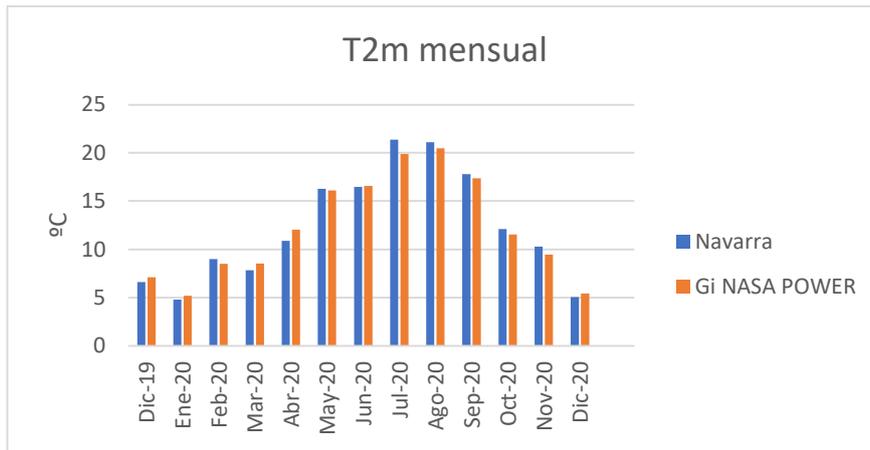


Ilustración 31 Temperatura mensual en el período de Diciembre 2019 a Diciembre 2020 entre los datasets de “meteo.navarra.es” y NASA POWER para Ujué.

En los resultados de temperatura la aproximación fue buena, aunque en algunos meses se sobre estimaba la temperatura y en otros pasa lo contrario.

15.3 Comparativa de los datos de Viento

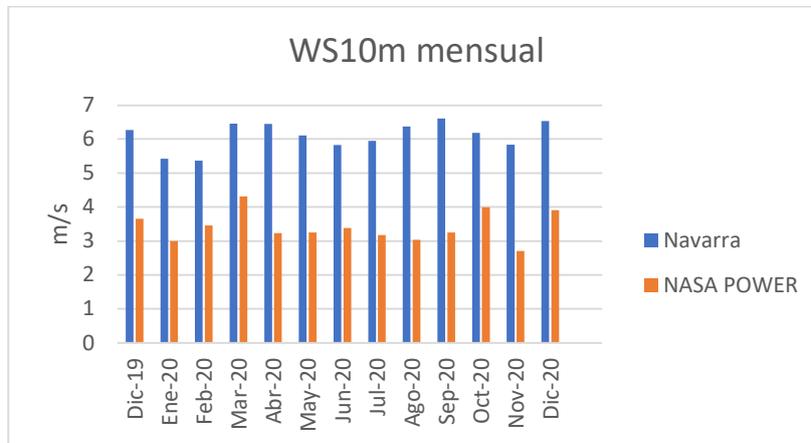


Ilustración 32 Velocidad de viento mensual en el período de Diciembre 2019 a Diciembre 2020 entre los datasets de “meteo.navarra.es” y NASA POWER para Ujué.

Los datos de viento son los que mas difieren de las mediciones en campo en la estación meteorológica. Como se puede comprobar en el Anexo 1, los distintos dataset no estiman una velocidad de viento mas alla de 5 m/s, sin embargo los datos reales muestran que el viento fue superior durante ese periodo.

16. Simulación con la herramienta iHoga

La herramienta iHoga (<https://ihoga.unizar.es/>) permite llevar a cabo optimizaciones mono-objetivo y multi-objetivo para obtener la mejor configuración para un sistema de generación

renovable, ya sea, aislado de la red o conectado a la red, con generadores de apoyo o sin generadores de apoyo. Además, tras obtener el resultado de la optimización se nos muestran una serie de parámetros financieros que permiten valorar distintas las distintas opciones.

Uno de los resultados más útiles es que el programa devuelve un informe detallado de la mejor configuración de los componentes del sistema, generadores, equipos auxiliares, entre otros, todo ello para una ubicación específica, siendo los datos obtenidos de fuentes como NASA POWER, PVGIS o Renewable.ninja, también existe la posibilidad de utilizar bases de datos locales. En este trabajo hemos utilizado los datos obtenidos automáticamente de las tres fuentes mencionadas.

16.1 Simulación en la ciudad de Berlín

En este apartado se tomará como ejemplo a la ciudad de Berlín. Se presentan tres casos de estudio en los cuales se descargaron datos de disponibilidad de recurso solar y eólico de las tres fuentes NASA POWER, PVGIS y Renewables.ninja.

Se han realizado simulaciones con el software iHoga para las tres fuentes de datos a partir de las cuales se obtendrán optimizaciones iterativas de distintas configuraciones de elementos para configurar un sistema de energías renovables para autoconsumo aislado de la red. Los componentes de este sistema consistirán en generadores fotovoltaicos, generadores eólicos, un generador AC de apoyo, baterías, así como inversores y regulador del banco de baterías, cargas AC y DC.

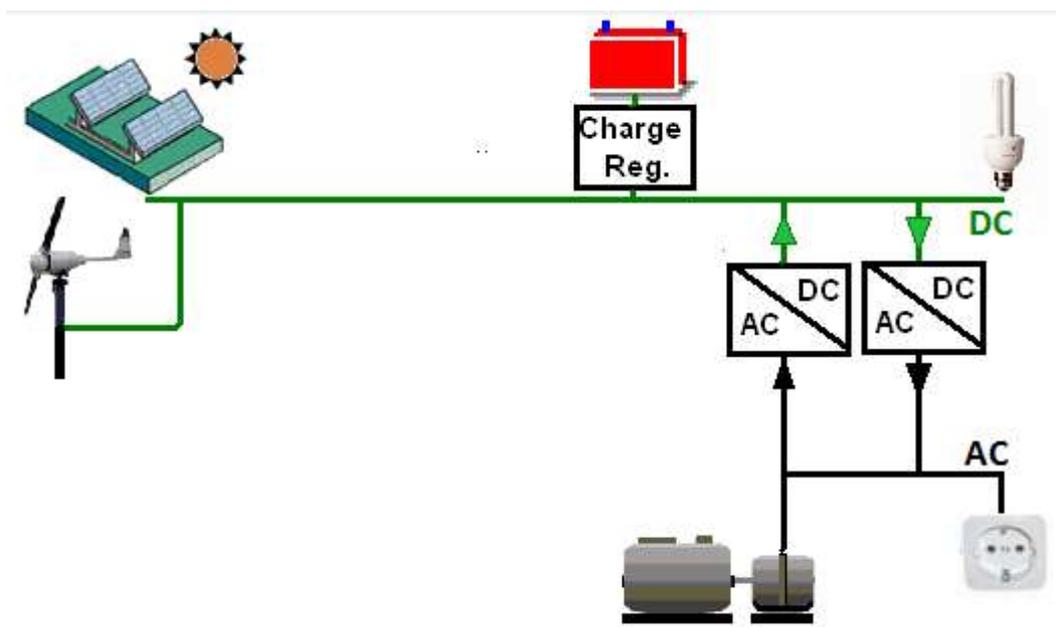


Ilustración 33 Esquema del sistema de generación de energía para autoconsumo conectado a la red.

Entre los resultados de las optimizaciones de iHoga podremos encontrar el coste de ciclo de vida de la posible inversión para adquirir este sistema, las emisiones de CO₂, la demanda y el LCoE (en inglés, Levelized Cost of Energy). Se tratará de una optimización mono-objetivo, es decir que la variable a optimizar será el coste (coste de ciclo de vida) que será actualizado al momento inicial de la inversión. En el Anexo 3 se adjuntarán los informes obtenidos tras la simulación del programa. La demanda de energía se ha supuesto la de una vivienda de consumo promedio (3.63 kWh/día).

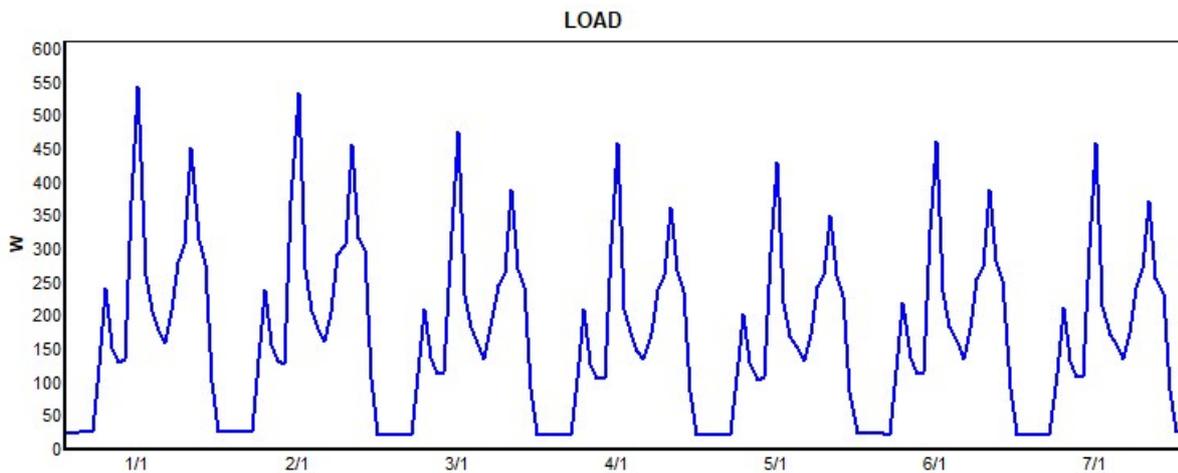


Ilustración 34 Curva de demanda de una semana de la vivienda del ejemplo.

Los datos de irradiación y viento se descargaron por el mismo programa iHoga de las tres fuentes de estudio que dan lugar a los tres casos de estudio que se presentan a continuación.

16.1.1 Caso 1 Datos obtenidos de NASA POWER

Los datos obtenidos de NASA POWER corresponden a los de un año típico meteorológico y el resto de parámetros, características de componentes y curva de demanda, son comunes a los tres casos. iHoga realiza una selección iterativa de entre diversos componentes, por ejemplo, de distintas marcas, distinto coste de O&M, entre otras características. Tras lanzar la simulación se obtienen los resultados de todos los parámetros.

En la siguiente imagen se muestra una gráfica resumiendo los 100 mejores resultados de la simulación ordenados de menor coste de inversión a mayor coste. En rojo se puede observar la evolución del parámetro coste de inversión y en verde las emisiones de CO2 de las configuraciones de elementos resultantes a lo largo de las 100 últimas iteraciones hasta encontrar el resultado optimizado en costes totales de inversión.

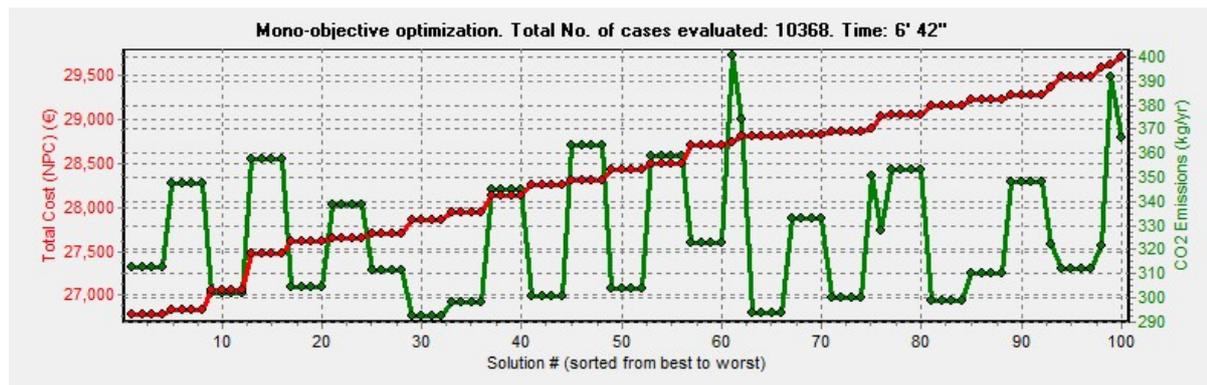


Ilustración 35 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de NASA POWER.

COMPONENTS: PV modules aSi12-Schott: ASI100 (100 Wp): 4s. x 14p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 0°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-3 (180 Ah): 24s. x 1p. // 1 x AC Gen. Diesel 1.9kVA 1.9 kVA // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // Rectif. included in bi-di inverter // PV batt. charge controller. STECA: P TAROM 4140 of 149 A // Unmet load = 0.7 % // Total Cost (NPC) = 26778.9 € (0.92 €/kWh)
 STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin gen: 570 W. Pcritical gen: 0 W. SOC setpoint gen: 20 %. SOC min.: 20 %.

Ilustración 36 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de NASA POWER.

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 14 en paralelo.

- Baterías de 180Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Un Generador Diesel de apoyo de 1.9kVA.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 149A.

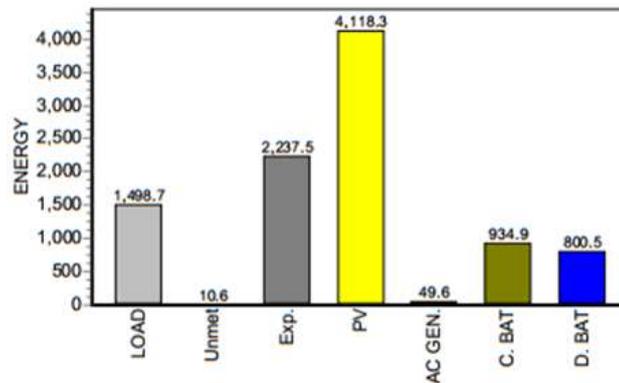


Ilustración 37 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

En el diagrama anterior se muestran en unidades de “kWh” aparecen de izquierda a derecha, la demanda de energía, la demanda desatendida, los excedentes de energía, la generación fotovoltaica, la generación de energía de los servicios de apoyo, la energía absorbida por las baterías y la energía cedida por las baterías.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 0.7% al año.

16.1.2 Caso 2 Datos obtenidos de PVGIS

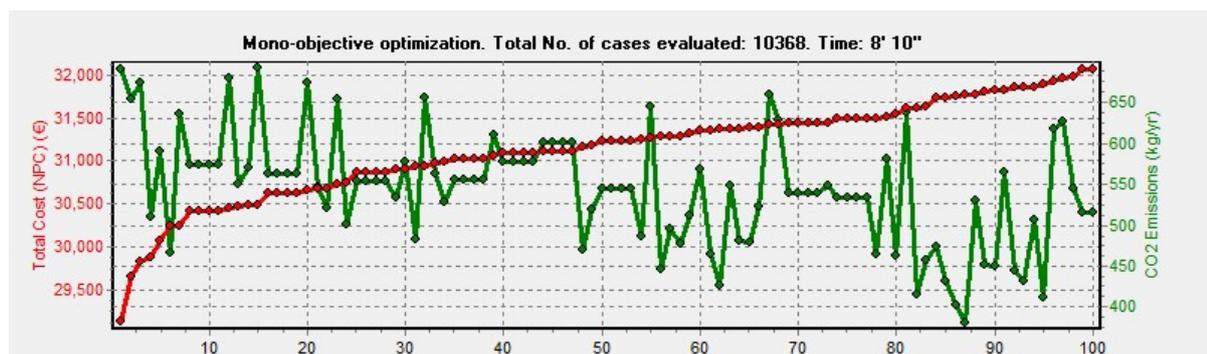


Ilustración 38 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de PVGIS.

Los datos que se utilizaron corresponden al año 2015, se realizó la simulación manteniendo el resto de los parámetros iguales al caso anterior. Tras la optimización se obtiene un sistema formado por:

COMPONENTS: PV modules aSil2-Schott: ASI100 (100 Wp): 4s.x 4p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 0°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-3 (180 Ah): 24s. x 1p. // 1 x AC Gen. Diesel 1.9kVA 1.9 kVA // 1 Wind Turb. DC Southwest:Whisper100(925 W at 14 m/s) // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // Rectif. included in bi-di inverter // PV batt. charge controller. STECA: TAROM 440 of 40 A // Unmet load = 1 % // Total Cost (NPC) = 29129.7 € (1 €/kWh)

STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin_gen: 570 W. Pcritical_gen: 0 W. SOC setpoint_gen: 20 %. SOC min.: 20 %.

Ilustración 39 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de PVGIS.

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 4 en paralelo.
- Baterías de 180Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Un Generador Diesel de apoyo de 1.9kVA.
- Una turbina eólica de 925W a 14 m/s.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 149A.

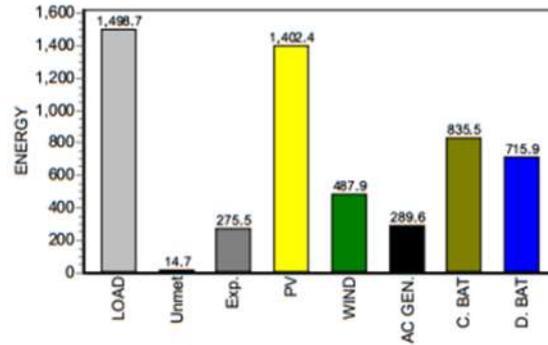


Ilustración 40 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

En este caso se incluyó la presencia de un generador eólico permitió disminuir la potencia instalada de paneles fotovoltaicos. También puede observarse la disminución de los excedentes de energía, sin embargo, los costes son superiores y la mayor actividad del generador Diesel hace que incrementen las emisiones de CO2.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 1% al año.

16.1.3 Caso 3 Datos obtenidos de Renewables.ninja

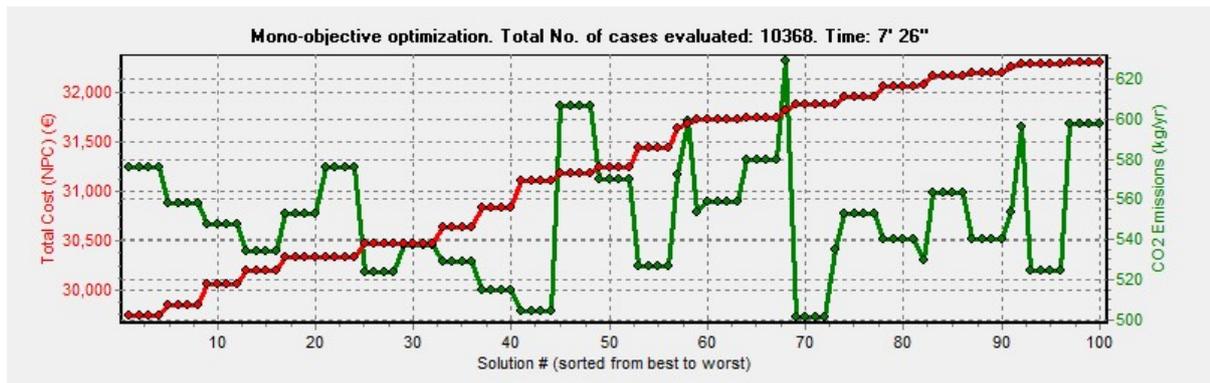


Ilustración 41 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de Renewables.ninja.

Los datos que se utilizaron corresponden al año 2019. Tras la optimización se obtiene un sistema formado por:

COMPONENTS: PV modules aSi12-Schott: ASI100 (100 Wp); 4s. x 11p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 0°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-3 (180 Ah); 24s. x 1p. // 1 x AC Gen. Diesel 1.9kVA 1.9 kVA // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // Rectif. included in bi-di inverter // PV batt. charge controller. STECA: P TARDOM 4140 of 149 A // Unmet load = 0.9 % // Total Cost (NPC) = 29748.1 € (1.02 €/kWh)

STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin_gen: 570 W. Pcritical_gen: 0 W. SOC setpoint_gen: 20 %. SOC min.: 20 %.

Ilustración 42 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de Renewables.ninja.

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 11 en paralelo.
- Baterías de 180Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Un Generador Diesel de apoyo de 1.9kVA.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 149A.

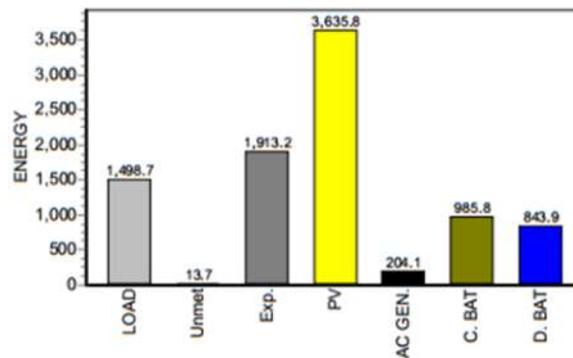


Ilustración 43 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

Como puede observarse en las tablas del Anexo 1 para la ciudad de Berlín, la estimación del recurso solar del dataset de reanálisis Renewables.ninja-MERRA-2 es mayor que la del dataset satelital de NASA POWER.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 0.9% al año.

16.2 Simulación en la ciudad de Santos

16.2.1 Caso 4 Datos obtenidos de NASA POWER

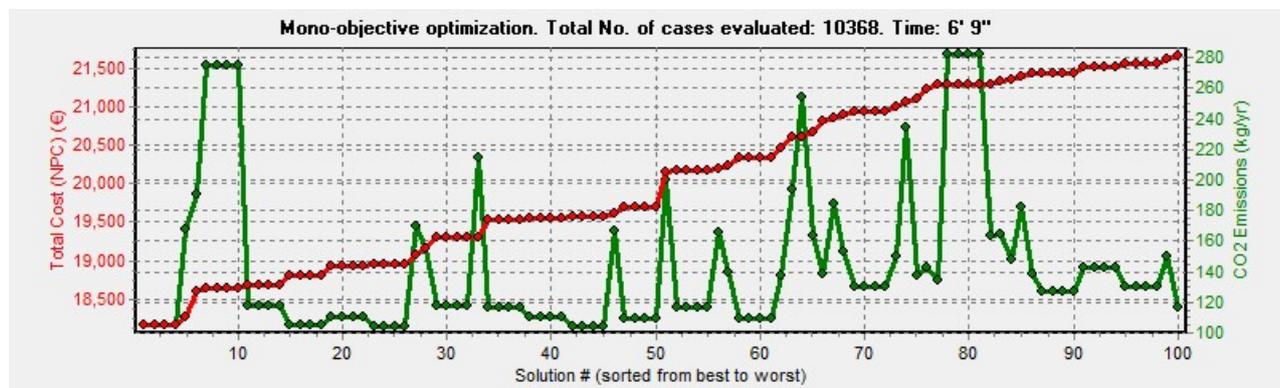


Ilustración 44 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de NASA POWER.

COMPONENTS: PV modules aSi12-Schott: ASI100 (100 Wp): 4s.x 5p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 180°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-3 (180 Ah): 24s. x 1p. // 1 x AC Gen. Gasoline 0.5kVA 0.5 kVA // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // PV batt. charge controller. STECA: P TAROM 4055 of 55 A // Unmet load = 0 % // Total Cost (NPC) = 18164.6 € (0.62 €/kWh)
 STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin_gen: 150 W. Pcritical_gen: 0 W. SOC setpoint_gen: 20 %. SOC min.: 20 %.

Ilustración 45 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de NASA POWER.

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 5 en paralelo.
- Baterías de 180Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Un Generador Diesel de apoyo de 0.5kVA.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 55A.

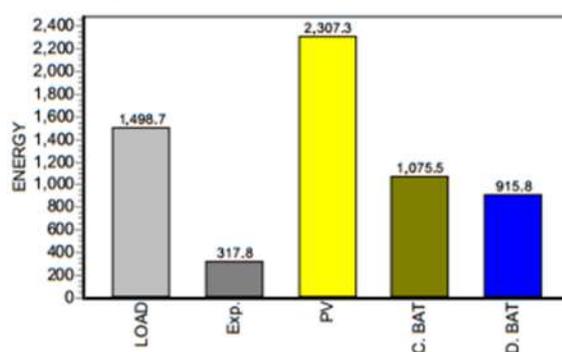


Ilustración 46 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 0% al año.

16.2.2 Caso 5 Datos obtenidos de PVGIS

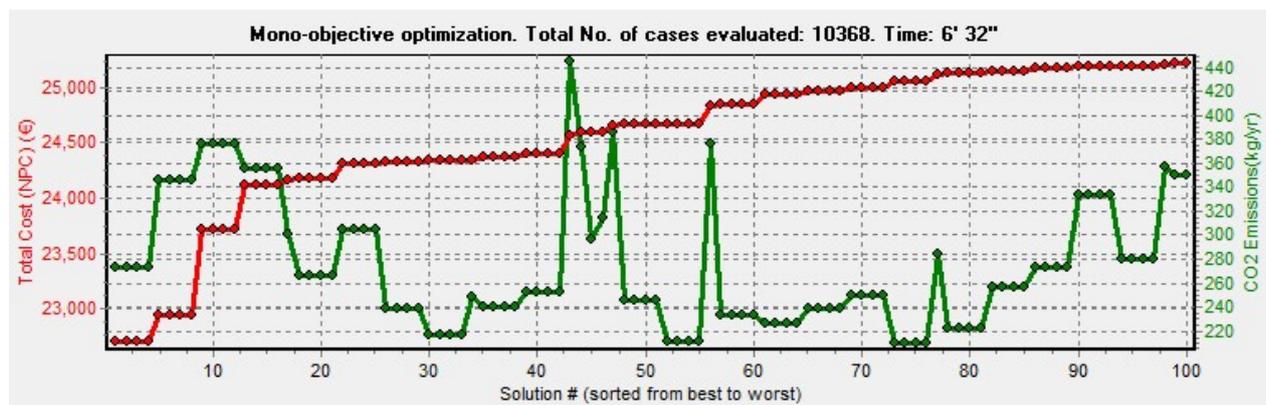


Ilustración 47 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de PVGIS.

COMPONENTS: PV modules aSi12-Schott: ASI100 (100 Wp): 4s.x 6p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 180°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-5 (270 Ah): 24s. x 1p. // 1 x AC Gen. Diesel 1.9kVA 1.9 kVA // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // Rectif. included in bi-di inverter // PV batt. charge controller. STECA: P TAROM 4055 of 55 A // Unmet load = 0.5 % // Total Cost (NPC) = 22708.3 € (0.78 €/kWh)
 STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin_gen: 570 W. Pcritical_gen: 0 W. SOC setpoint_gen: 20 %. SOC min.: 20 %.

Ilustración 48 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de PVGIS.

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 6 en paralelo.

- Baterías de 270Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Un Generador Diesel de apoyo de 1.9kVA.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 55A.

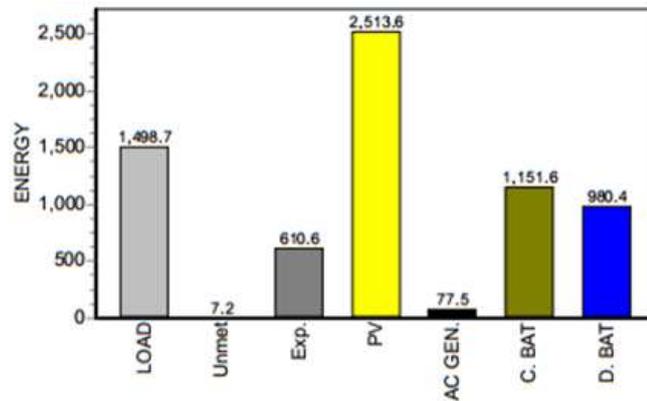


Ilustración 49 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 0.5% al año.

16.2.3 Caso 6 Datos obtenidos de Renewables.ninja

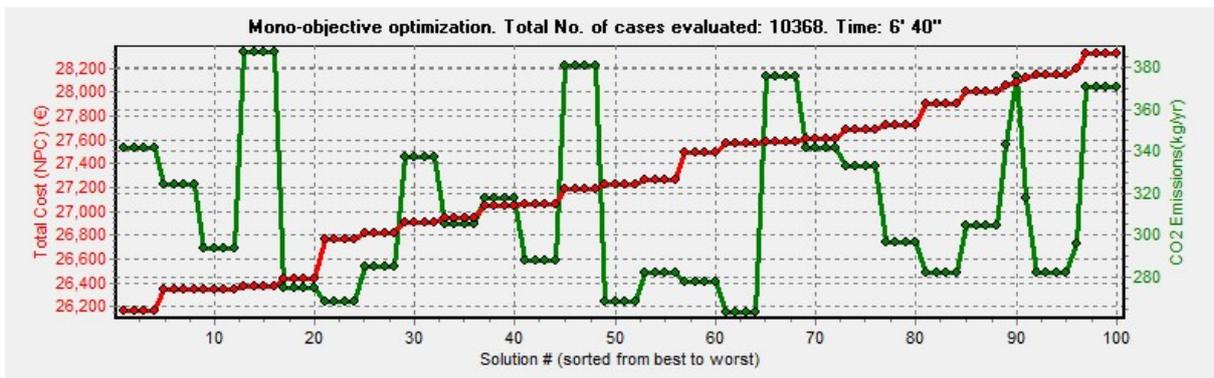


Ilustración 50 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de Renewables.ninja.

COMPONENTS: PV modules aSi12-Schott: ASI100 (100 Wp): 4s x 11p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 180°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-3 (180 Ah): 24s x 1p. // 1 x AC Gen. Diesel 1.9kVA 1.9 kVA // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // Rectif. included in bi-di inverter // PV batt. charge controller. STECA: P TAROM 4140 of 149 A // Unmet load = 0.9 % // Total Cost (NPC) = 26167.4 € (0.9 €/kWh)

STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin_gen: 570 W. Pcritical_gen: 0 W. SOC setpoint_gen: 20 %. SOC min.: 20 %.

Ilustración 51 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de Renewables.ninja.

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 11 en paralelo.
- Baterías de 180Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Un Generador Diesel de apoyo de 1.9kVA.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 149A.

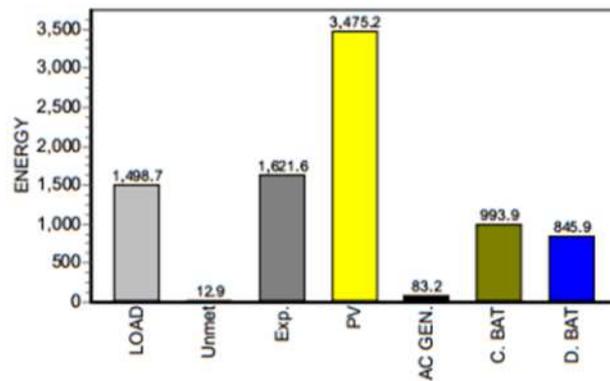


Ilustración 52 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 0.9% al año.

16.3 Simulación en la ciudad de Ampara

16.3.1 Caso 7 Datos obtenidos de NASA POWER

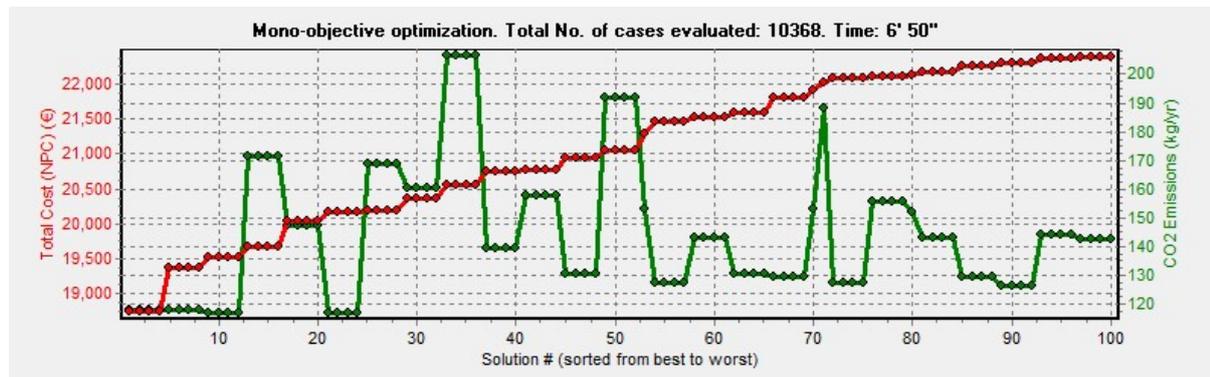


Ilustración 53 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de NASA POWER.

```
COMPONENTS: PV modules aSi12-Schott: ASI100 (100 Wp): 4s x 6p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 0°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-3 (180 Ah): 24s. x 1p. // 1 x AC Gen. Gasoline 0.5kVA 0.5 kVA // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // PV batt. charge controller. STECA: P TAROM 4055 of 55 A // Unmet load = 0 % // Total Cost (NPC) = 18748.9 € (0.64 €/kWh)

STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin_gen: 150 W. Pcritical_gen: 0 W. SOC setpoint_gen: 20 %. SOC min.: 20 %.
```

Ilustración 54 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de NASA POWER.

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 6 en paralelo.
- Baterías de 180Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Un Generador Gasolina de apoyo de 0.5kVA.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 55A.

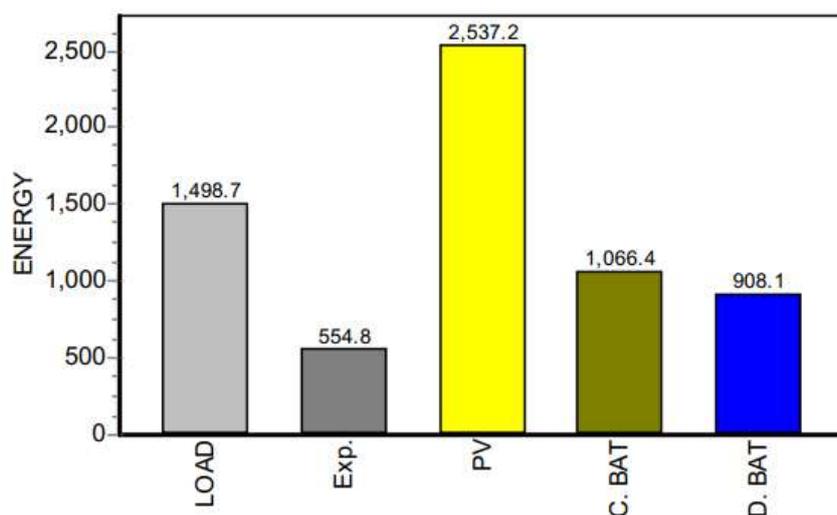


Ilustración 55 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 0% al año.

16.3.2 Caso 8 Datos obtenidos de PVGIS

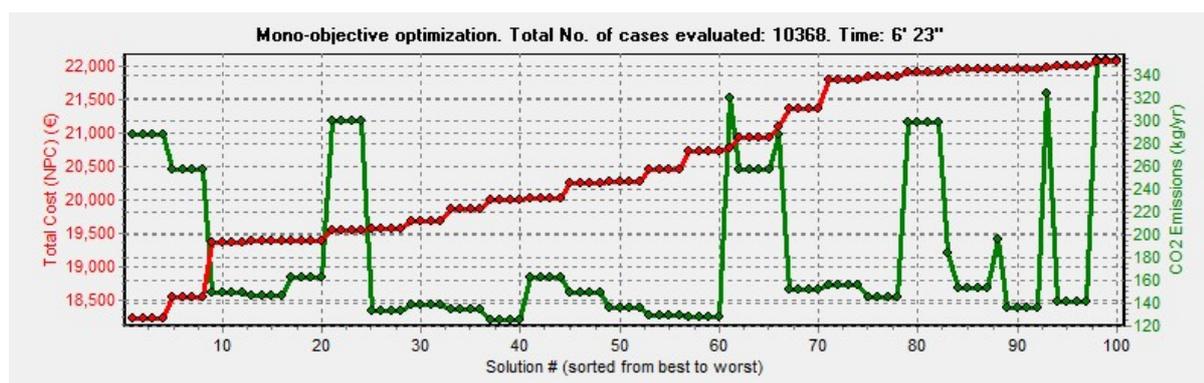


Ilustración 56 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de PVGIS.

COMPONENTS: PV modules aSi12-Schott: ASI100 (100 Wp): 4s.x 4p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 0°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-3 (180 Ah): 24s. x 1p. // 1 x AC Gen. Diesel 1.9kVA 1.9 kVA // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // Rectif. included in bi-di inverter // PV batt. charge controller. STECA: TAROM 440 of 40 A // Unmet load = 0.9 % // Total Cost (NPC) = 18218.7 € (0.63 €/kWh)

STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin_gen: 570 W. Pcritical_gen: 0 W. SOC setpoint_gen: 20 %. SOC min.: 20 %.

Ilustración 57 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de PVGIS.

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 4 en paralelo.
- Baterías de 180Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Un Generador Diesel de apoyo de 1.9kVA.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 40A.

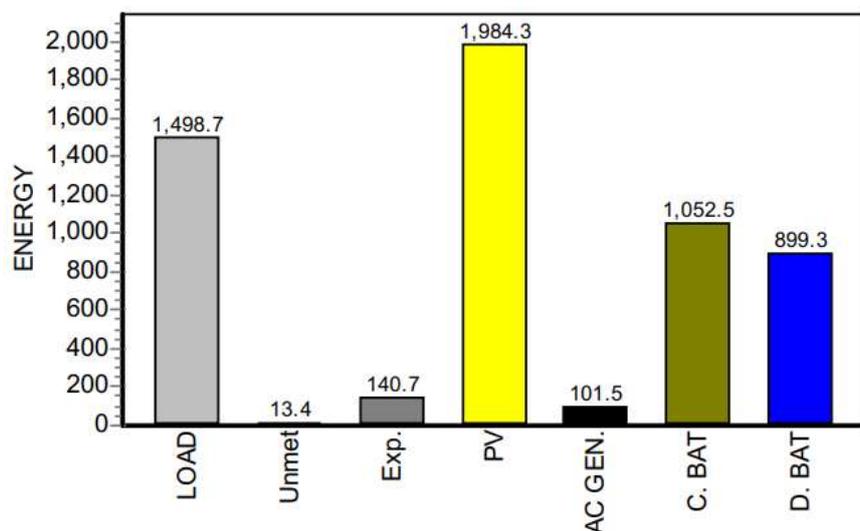


Ilustración 58 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 0.9% al año.

16.3.3 Caso 9 Datos obtenidos de Renewables.ninja

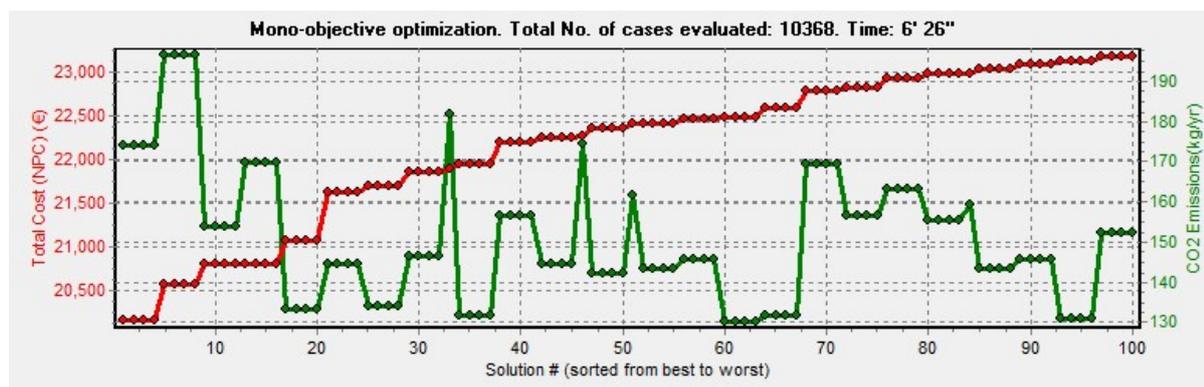


Ilustración 59 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de Renewables.ninja.

COMPONENTS: PV modules aSi12-Schott: ASI100 (100 Wp): 4s.x 6p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 0°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-3 (180 Ah): 24s. x 1p. // 1 x AC Gen. Diesel 1.9kVA 1.9 kVA // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // Rectif. included in bi-di inverter // PV batt. charge controller. STECA: P TARDOM 4055 of 55 A // Unmet load = 0.3 % // Total Cost (NPC) = 20160.6 € (0.69 €/kWh)

STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin_gen: 570 W. Pcritical_gen: 0 W. SOC setpoint_gen: 20 %. SOC min.: 20 %.

Ilustración 60 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de Renewables.ninja

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 6 en paralelo.
- Baterías de 180Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Un Generador Diesel de apoyo de 1.9kVA.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 55A.

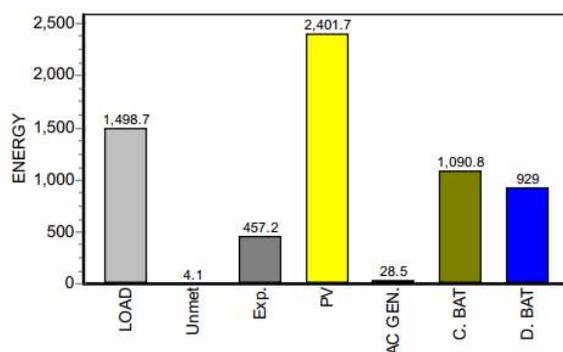


Ilustración 61 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 0.3% al año.

16.4 Simulación en la ciudad de Antsirananana

16.4.1 Caso 10 Datos obtenidos de NASA POWER

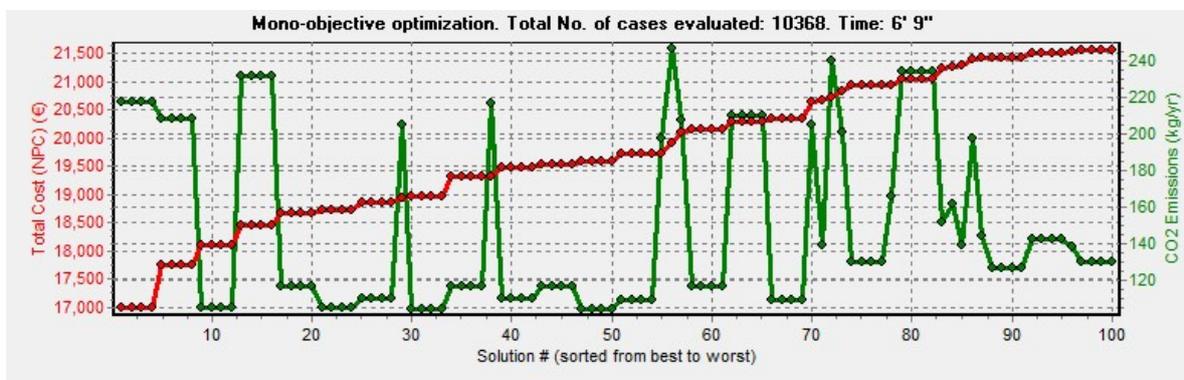


Ilustración 62 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de NASA POWER.

COMPONENTS: PV modules aSi12-Schott: ASI100 (100 Wp): 4s. x 4p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 180°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-3 (180 Ah): 24s. x 1p. // 1 x AC Gen. Diesel 1.9kVA 1.9 kVA // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // Rectif. included in bi-di inverter // PV batt. charge controller. STECA: TAROM 440 of 40 A // Unmet load = 0.7 % // Total Cost (NPC) = 16990.3 € (0.58 €/kWh)

STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin_gen: 570 W. Pcritical_gen: 0 W. SOC setpoint_gen: 20 %. SOC min.: 20 %.

Ilustración 63 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de NASA POWER.

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 4 en paralelo.
- Baterías de 180Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Un Generador Diesel de apoyo de 1.9kVA.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 40A.

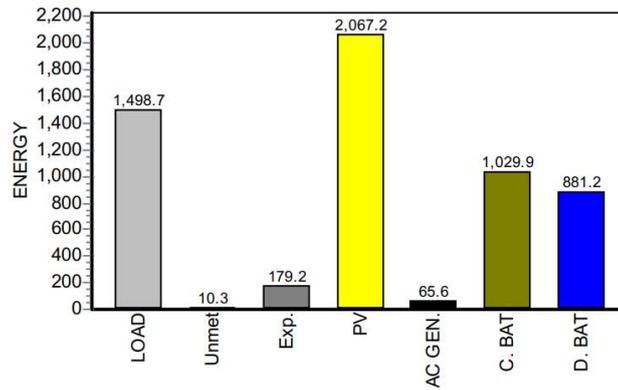


Ilustración 64 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 0.7% al año.

16.4.2 Caso 11 Datos obtenidos de PVGIS

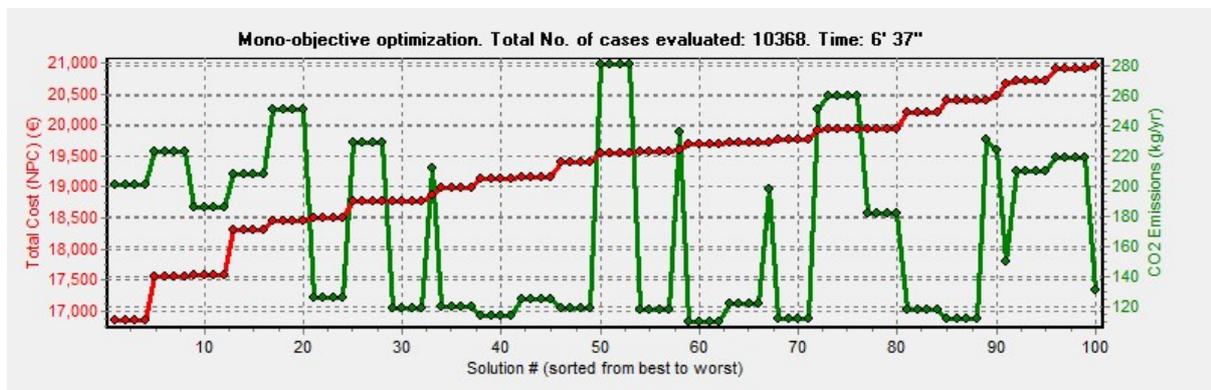


Ilustración 65 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de PVGIS.

COMPONENTS: PV modules aSi12-Schott: ASI100 (100 Wp): 4s.x 4p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 180°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-3 (180 Ah): 24s. x 1p. // 1 x AC Gen. Diesel 1.9kVA 1.9 kVA // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // Rectif. included in bi-di inverter // PV batt. charge controller. STECA: TAROM 440 of 40 A // Unmet load = 0.4 % // Total Cost (NPC) = 16853.3 € (0.58 €/kWh)

STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin_gen: 570 W. Pcritical_gen: 0 W. SOC setpoint_gen: 20 %. SOC min.: 20 %.

Ilustración 66 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de PVGIS.

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 4 en paralelo.
- Baterías de 180Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Un Generador Diesel de apoyo de 1.9kVA.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 40A.

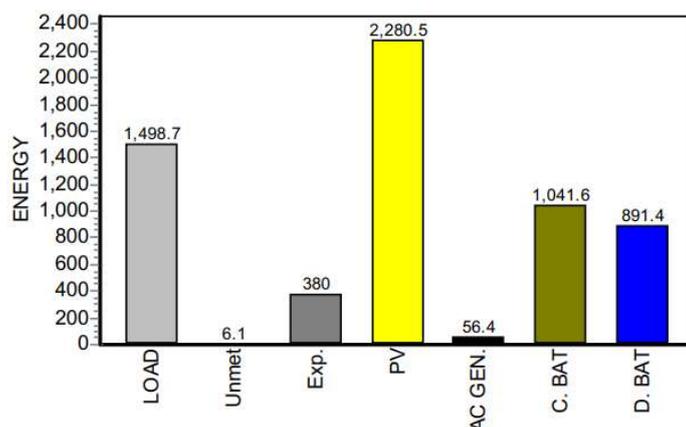


Ilustración 67 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 0.4% al año.

16.4.3 Caso 12 Datos obtenidos de Renewables.ninja

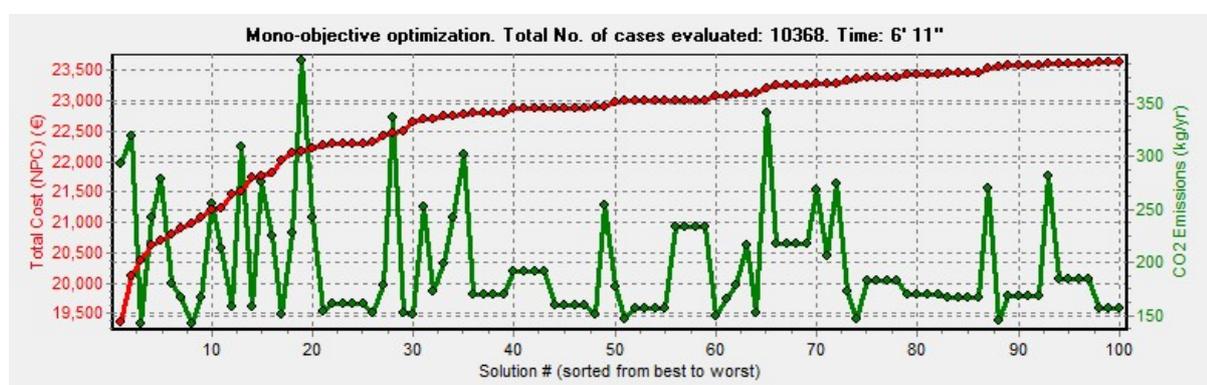


Ilustración 68 Curva de coste y de emisiones en las 100 mejores optimizaciones para los datos de Renewables.ninja.

COMPONENTS: PV modules aSi12-Schott: ASI100 (100 Wp): 4s.x 4p. (100% PV#1: slope 35°, azimuth 180°) // Batteries OPZS-Hawker: TLS-3 (180 Ah): 24s. x 1p. // 1 x AC Gen. Diesel 1.9kVA 1.9 kVA // 1 Wind Turb. DC Southwest: AIR X(547 W at 14 m/s) // Inverter STECA: XPC 1600-48 of 1600 VA // Rectif. included in bi-di inverter // PV batt. charge controller. STECA: TAROM 440 of 40 A // Unmet load = 0.8 % // Total Cost (NPC) = 19358.2 € (0.66 €/kWh)

STRATEGY: LOAD FOLLOWING. P1gen: INF. Pmin_gen: 570 W. Pcritical_gen: 0 W. SOC setpoint_gen: 20 %. SOC min.: 20 %.

Ilustración 69 Resumen del mejor resultado obtenido de la simulación para los datos de Renewables.ninja.

La mejor combinación para este caso consiste en:

- Paneles de 100Wp configurados 4 en serie y 4 en paralelo.
- Baterías de 180Ah configurados 24 en serie y 1 en paralelo.
- Una turbina eólica de 547 W a 14 m/s.
- Un Generador Diesel de apoyo de 1.9kVA.
- Un Inversor bidireccional de 1600VA.
- Un regulador de batería de 40A.

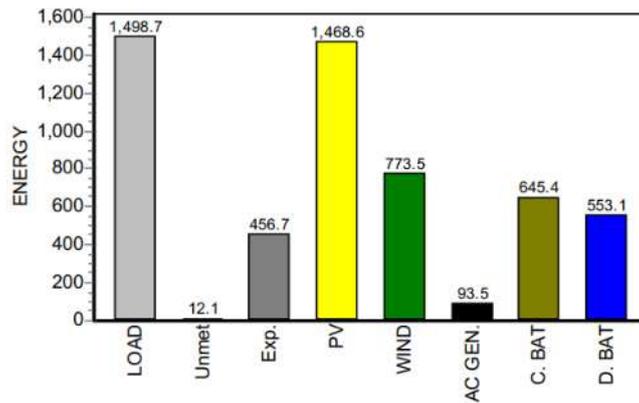


Ilustración 70 Balance de energía del sistema a lo largo del año.

El resumen también nos indica que la demanda eléctrica desatendida es de 0.8% al año.

16.5 Análisis de las simulaciones

		Potencia FV instalada (kWp)	Energía FV generada (kWh/año)	kWh/año producido por kWp instalado	Energía eólica generada (kWh/año)	Cobertura de la demanda con EERR (%)
Berlin	Caso 1	5.6	4118.3	735.4	-	96%
	Caso 2	1.6	1402.4	876.5	487.9	79%
	Caso 3	4.4	3635.8	826.3	-	86%
Santos	Caso 4	2.0	2307.3	1153.7	-	100%
	Caso 5	2.4	2513.6	1047.3	-	94%
	Caso 6	4.4	3475.2	789.8	-	94%
Ampara	Caso 7	2.4	2537.2	1057.2	-	100%
	Caso 8	1.6	1984.3	1240.2	-	92%
	Caso 9	2.4	2401.7	1000.7	-	98%
Antsiranana	Caso 10	1.6	2067.2	1292.0	-	95%
	Caso 11	1.6	2280.5	1425.3	-	96%
	Caso 12	1.6	1468.6	917.9	773.5	93%

Tabla 19 Recopilación de la producción de energía en los distintos casos.

Se han realizado simulaciones para 4 ubicaciones por limitaciones relacionadas con la licencia educativa del software. En cada ubicación se realizaron 3 casos, el primero con datos de NASA POWER, el segundo de PVGIS y el tercero de Renewables.ninja.

Según indican estos resultados, para la ubicación de Berlín (Caso 1, 2 y 3), la mayor producción fotovoltaica se observa con los datos del Caso 1 que corresponde a los datos de NASA POWER para un TMY, es decir, el típico año meteorológico. Los datos de PVGIS y Renewables.ninja corresponden a datos horarios y esto también sucede en los demás casos.

Cabe destacar que la mayor producción renovable en kWh/año por kWp instalado se obtiene con los datos de PVGIS y la menor con los datos de Renewables.ninja, la ubicación de Berlín es la excepción de esta regla.

17. Conclusiones

Las tres fuentes de datos aportan datos consistentes entre sí de irradiación, temperatura y viento con un alto coeficiente de correlación entre los datasets. Sin embargo, existen diferencias entre los resultados de los distintos datasets disponibles, como regla general se ha observado que los resultados de Renewables.ninja son una estimación más conservadora con respecto a las otras fuentes y presenta valores menores de irradiancia, en cambio, los resultados de PVGIS-SARAH y PVGIS-CMSAF suelen ser estimaciones más altas de irradiancia o irradiación. En cuanto a la temperatura los valores son bastante cercanos entre los datasets, destacando como regla general los valores de Renewables.ninja como los más altos y los menores suelen ser los de PVGIS. El dataset que presenta los valores de viento generalmente más altos es Renewables.ninja y el que presenta los menores es PVGIS. Otra observación que vale la pena mencionar es que los datasets de reanálisis modernos (ERA5) suponen un avance en el campo de los reanálisis, ya que se ha comprobado que se aproximan mejor a los resultados de los datasets de observaciones satelitales, y por ende a las magnitudes reales de los parámetros climatológicos y de irradiancia.

Al realizar la comparativa con los datos medidos en campo, el dataset de NASA POWER fue la única fuente que disponía de datos en el mismo período que los que disponía la web “meteo.navarra.es”, la comparativa de los datos de irradiación y temperatura indicó que la estimación era buena y se aproximaban bastante a la realidad, sin embargo, esto no sucede con los datos de viento. Finalmente se realizaron simulaciones con el software iHoga para estimar la producción de fuentes renovables y se obtuvo que los resultados no son iguales en todas las ubicaciones. Por esta razón cada estudio de la disponibilidad de los recursos y, por tanto, la viabilidad de un proyecto de energías renovables debería de realizarse de manera particular para una determinada ubicación. El sesgo que existe entre las distintas fuentes no permite realizar una valoración concreta desde el punto de vista financiero, existen diferencias importantes en la estimación de un año para otro y entre los distintos datasets actuales. Si bien los datasets modernos permiten conocer las zonas en donde es más probable tener una alta disponibilidad de las fuentes de energía renovable, difícilmente puede hacerse una estimación financiera determinante.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Yang, D., & Bright, J. M. (2020). Worldwide validation of 8 satellite-derived and reanalysis solar radiation products: A preliminary evaluation and overall metrics for hourly data over 27 years. *Solar Energy*, 210, 3-19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.016>

- [2] The European Commission's science and knowledge service. (2020). *Data sources and calculation methods.*, 2021, from <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/methods>

- [3] E.E. Hofmann, M. A. M. F. (2001). *Encyclopedia of ocean sciences* (second edition).

- [4] Uppala, S. M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D., Fiorino, M., et al. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612), 2961-3012.

- [5] The European Commission's science and knowledge service. (2020). *Preliminary description of the new reanalysis-based data in PVGIS*, 2021, from <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/reanalysis>
- [6] Staffell, I., & Pfenninger, S. (2016). Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *Energy*, 114, 1224-1239. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068>
- [7] Yao, B., Teng, S., Lai, R., Xu, X., Yin, Y., Shi, C., et al. (2020). Can atmospheric reanalyses (CRA and ERA5) represent cloud spatiotemporal characteristics? *Atmospheric Research*, 244, 105091. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105091>
- [8] Global Modeling and Assimilation Office. (2015). *GMAO mission.*, 2021, from https://gmao.gsfc.nasa.gov/gmao_mission/
- [9] Paul Stackhouse, J., Ph.D. (2019). **POWER data methodology.**, 2021, from <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/>
- [10] Payer, M. (2018). **GEOS-FP data processing software.**, 2021, from http://wiki.seas.harvard.edu/geos-chem/index.php/GEOS-FP_data_processing_software
- [11] Paul Stackhouse, J., Ph.D. (2019). **POWER data methodology. data sources.**, 2021, from <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/data/>
- [12] Norman Loeb. (2021). **What is CERES?**, 2021, from <https://ceres.larc.nasa.gov/>
- [13] Ana Gracia Amillo, Thomas Huld, Irene Pinedo Pascua, Ruben Urraca, Ewan Dunlop. (2019, Photovoltaic geographical information system. *EUMETSAT CM SAF 5th User Workshop, 4th June 2019, Mainz*,
- [14] Psiloglou, B. E., Kambezidis, H. D., Kaskaoutis, D. G., Karagiannis, D., & Polo, J. M. (2020). Comparison between MRM simulations, CAMS and PVGIS databases with measured solar radiation components at the methoni station, greece. *Renewable Energy*, 146, 1372-1391. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.064>

- [15] Pfenninger, S., & Staffell, I. (2016). Long-term patterns of european PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. *Energy*, 114, 1251-1265.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.060>
- [16] Stefan Pfenninger, Iain Staffell, and Malte Jansen. (2018). Renewables.ninja - A model for the global output of weather-dependent renewable energy sources. *EMS Annual Meeting Abstracts*, 15
- [17] Babar, B., Graversen, R., & Boström, T. (2019). Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the CMSAF databases, ASR and ERA5. *Solar Energy*, 182, 397-411.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.058>