



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y DISEÑO  
INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería Eléctrica

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**TÍTULO DEL TRABAJO**

Francisco Delgado López

*Tutor:* Óscar Perpiñán Lamigueiro

*Departamento:* Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Física Aplicada

Madrid, Septiembre, 2024



Copyright ©2024. Francisco Delgado López

Esta obra está licenciada bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivadas 3.0 Unported (CC BY-NC-ND 3.0). Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.es> o envíe una carta a Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, EE.UU.

Todas las opiniones aquí expresadas son del autor, y no reflejan necesariamente las opiniones de la Universidad Politécnica de Madrid.



**Título:** título del trabajo

**Autor:** Francisco Delgado López

**Tutor:** Óscar Perpiñán Lamigueiro

## EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día ..... de ..... de ... en ....., en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Agradecimientos

Agradezco a ...





# Resumen

Este proyecto se resume en .....

**Palabras clave:** geometría solar, radiación solar, energía solar, fotovoltaica, métodos de visualización, series temporales, datos espacio-temporales, S4



# Abstract

In this project.....

**Keywords:** solar geometry, solar radiation, solar energy, photovoltaic, visualitation methods, temporal series, space-time data, S4

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract</b>	<b>XI</b>
<b>Índice general</b>	<b>XII</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XIII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	1
1.2. Materiales utilizados . . . . .	1
1.3. Estructura del documento . . . . .	2
<b>2 Estado del arte</b>	<b>3</b>
2.1. Situación actual de la generación fotovoltaica . . . . .	3
2.2. Soluciones existentes y sus carencias . . . . .	4
<b>3 Parte teórica y desarrollo del código</b>	<b>5</b>
<b>4 Ejemplo práctico de aplicación</b>	<b>7</b>
4.1. solaR2 . . . . .	7
4.2. solaR . . . . .	7
4.3. PVsyst . . . . .	7
4.4. Comparación entre los tres . . . . .	7
<b>5 Detalles de la programación</b>	<b>9</b>
<b>A Código completo</b>	<b>11</b>
A.1. Funciones . . . . .	11
A.2. Métodos . . . . .	11
A.3. Clases . . . . .	13
A.4. Tests . . . . .	13
<b>Bibliografía</b>	<b>15</b>

# Índice de figuras

# Índice de tablas

# Introducción

## 1.1. Objetivos

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de un paquete en R[R C23] con el cual poder realizar estimaciones y representaciones gráficas de la posible generación de una instalación fotovoltaica.

Durante el resto del documento, si fuera necesario, se hará referencia al paquete desarrollado en este proyecto con el nombre `solaR2` [CITAR SOLAR2].

El usuario podrá colocar los datos que considere convenientes (desde una base de datos oficial, una base de datos propia. . . etc.) en cada una de las funciones que ofrece el paquete pudiendo así obtener resultados de la geometría solar, de la radiación horizontal, de la eficaz y hasta de la producción de diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos.

El paquete también incluye una serie de funciones que permiten hacer representaciones gráficas de estas producciones con el fin de poder apreciar con más detalle las diferencias entre sistemas y contemplar cual es la mejor opción para el emplazamiento elegido.

Este proyecto toma su origen en el paquete ya existente `solaR`[Per12] el cual desarrolló el tutor de este proyecto en 2012. Por la antigüedad del código se propuso la idea de renovarlo teniendo en cuenta el paquete en el que basa su funcionamiento. El paquete `solaR` basó su funcionamiento en el paquete `zoo`[ZG05] el cual proporciona una sólida base para trabajar con series temporales. Sin embargo, como base de `solaR2` se optó por el paquete `data.table`[Bar+24]. Este paquete ofrece una extensión de los clásicos `data.frame` de R en los `data.table`, los cuales pueden trabajar rápidamente con enormes cantidades de datos (por ejemplo, 100 GB de RAM).

La clave de ambos proyectos es que al estar alojados en R, cualquier usuario puede acceder a ellos de forma gratuita, tan solo necesitas tener instalado R en tu dispositivo.

Para alojar este proyecto se toman dos vías:

- Github[Wan+23]: Donde se aloja la versión de desarrollo del paquete.
- CRAN: Acrónimo de Comprehensive R Archive Network, es el repositorio donde se alojan las versiones definitivas de los paquetes y desde el cual se descargan a la sesión de R.

## 1.2. Materiales utilizados

...

### 1.3. Estructura del documento

A continuación y para facilitar la lectura del documento, se detalla el contenido de cada capítulo.

- En el capítulo 1 se realiza una introducción
- En el capítulo 2 se hace un repaso. . .



## Estado del arte

### 2.1. Situación actual de la generación fotovoltaica

Según el informe anual de 2023 de la UNEF<sup>1</sup>[UNE23] en 2022 la fotovoltaica se posicionó como la tecnología con más crecimiento a nivel internacional, tanto entre las renovables como entre las no renovables. Se instalaron 240 GWp de nueva capacidad fotovoltaica a nivel mundial, suponiendo esto un incremento del 137 % con respecto a 2021.

A pesar de las diversas crisis internacionales, la energía solar fotovoltaica alcanzó a superar los 1185 GWp instalados. Como otros años, las cifras indican que China continuó siendo el primer actor mundial, superando los 106 GWp de potencia instalada en el año. La Unión Europea se situó en el segundo puesto, duplicando la potencia instalada en 2021, y alcanzando un nuevo record con 41 GWp instalados en 2022.

La producción energía fotovoltaica a nivel mundial representó el 31 % de la capacidad de generación renovable, convirtiéndose así en la segunda fuente de generación, solo por detrás de la energía hidráulica. En 2022 se añadió 3 veces más de energía solar que de energía eólica en todo el mundo.

Por otro lado, la Unión Europea superó a EE.UU. como el segundo mayor actor mundial en desarrollo fotovoltaico, instalando un 47 % más que en 2021 y alcanzando una potencia acumulada de más de 208 GWp. España lideró el mercado europeo con 8,6 GWp instalados en 2022, superando a Alemania.

El año 2022 fue significativo en términos legislativos con el lanzamiento del Plan REPowerEU<sup>2</sup>[Eur22]. Dentro de este plan, se lanzó la Estrategia de Energía Solar con el objetivo de alcanzar 400 GWp (320 GW) para 2030, incluyendo medidas para desarrollar tejados solares, impulsar la industria fotovoltaica y apoyar la formación de profesionales en el sector.

En 2022, España vivió un auge en el desarrollo fotovoltaico, instalando 5.641 MWp en plantas en suelo, un 30 % más que en 2021, y aumentando el autoconsumo en un 108 %, alcanzando 3.008 MWp. El sector industrial de autoconsumo creció notablemente, representando el 47 % del autoconsumo total.

España implementó varias iniciativas legislativas para enfrentar la volatilidad de precios de la energía y la dependencia del gas, destacando el RD-ley 6/2022[BOE22b] y el RD 10/2022[BOE22a], que han modificado mecanismos de precios y estableciendo límites al precio del gas.

---

<sup>1</sup>UNEF: Unión Española Fotovoltaica.

<sup>2</sup>Plan REPowerEU: Proyecto por el cual la Unión Europea quiere poner fin a su dependencia de los combustibles fósiles rusos ahorrando energía, diversificando los suministros y acelerando la transición hacia una energía limpia.

El Plan SE+<sup>3</sup>[dem22] incluye medidas fiscales y administrativas para apoyar las renovables y el autoconsumo. En 2022, se realizaron subastas de energía renovable, asignando 140 MW a solar fotovoltaica en la tercera subasta y 1.800MW en la cuarta, aunque esta última quedó desierta por precios de reserva bajos.

Se adjudicaron 1.200 MW del nudo de transición justa de Andorra a Enel Green Power España, con planes para instalar plantas de hidrógeno verde y agrovoltaica. la actividad en hidrógeno verde y almacenamiento también creció, con fondos adicionales y exenciones de cargos.

El autoconsumo, apoyado por diversas regulaciones y altos precios de la electricidad, registró un crecimiento significativo, alcanzado 2.504 MW de nueva potencia en 2022. Las comunidades energéticas también avanzaron gracias a ayudas específicas, a pesar de la falta de un marco regulatorio definido.

2022 estuvo marcado por los programas financiados por la Unión Europea, especialmente el Mecanismo de Recuperación y Resiliencia[Hac22] que canaliza los fondos Next-GenerationEU[Uni20]. El PERTE<sup>4</sup>, aprobado en diciembre de 2021, espera crear más de 280.000 empleos, con ayudas que se ejecutarán hasta 2026. En 2023 se solicitó a Bruselas una adenda para segunda fase del PERTE, obteniendo 2.700 millones de euros adicionales.

La contribución del sector fotovoltaico a la economía española en 2022 fue significativa, aportando 7.014 millones de euros al PIB<sup>5</sup>, un 51 % más que el año anterior, y generando una huella económica total de 15.656 millones de euros. En términos de empleo, el sector involucró a 197.383 trabajadores, de los cuales 40.683 fueron directos, 97.600 indirectos y 59.100 inducidos.

El sector industrial fotovoltaico nacional tiene una fuerte presencia en España, con hasta un 65 % de los componentes manufacturados localmente. Empresas españolas se encuentran entre los principales fabricantes mundiales de inversores y seguidores solares. Además, España es un importante exportador de estructuras fotovoltaicas y cuenta con iniciativas prometedoras para la fabricación de módulos solares.

UNEF promueve la transformación industrial para que España se convierta en un hub industrial fotovoltaico. Se destaca la necesidad de proteger la industria existente, garantizar un crecimiento constante de la capacidad y ofrecer condiciones de financiamiento favorables. Además se propone implementar una Estrategia Industrial Fotovoltaica para contribuir significativamente a la reindustrialización de la economía, aprovechando las medidas del REPower Plan, la Estrategia Solar y la Alianza de la Industria Solar Fotovoltaica.

En definitiva, la fotovoltaica es una tecnología en auge y con perspectivas para ser el pilar de la transición ecológica. Por ello, surge la necesidad de encontrar herramientas que permitan estimar el desempeño que estos sistemas pueden tener a la hora de realizar estudios de viabilidad económica.

## 2.2. Soluciones existentes y sus carencias

---

<sup>3</sup>Plan + Seguridad Energética: Se trata de un plan con medidas de rápido impacto dirigidas al invierno 2022/2023, junto con medidas que contribuyen a un refuerzo estructural de esa seguridad energética.

<sup>4</sup>PERTE: Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica.

<sup>5</sup>PIB: Producto Interior Bruto.

# Parte teórica y desarrollo del código

...



# Ejemplo práctico de aplicación

Como demostración se va a realizar un caso práctico...

## 4.1. solaR2

...

## 4.2. solaR

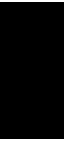
...

## 4.3. PVsyst

...

## 4.4. Comparación entre los tres





# Detalles de la programación

...





## Código completo

Todo el código que se muestra a continuación está disponible...

### A.1. Funciones

### A.2. Métodos

```
1 x <- 100
2 y <- 200
3 x+y
```

```
[1] 300
```

```
1 x <- 2
2 x*8
```

```
[1] 16
```

```
1 example(calcG0)
```

```
[[file: G0dm = c(2.766, 3.491, 4.494, 5.912, 6.989, 7.742, 7.919, 7.027, 5.369, 3.562, 2.814,
2.179)*1000; Ta = c(10, 14.1, 15.6, 17.2, 19.3, 21.2, 28.4, 29.9, 24.3, 18.2, 17.2, calcG0+
15.2) g0 <- calcG0(lat = 37.2, modeRad = 'prom', dataRad = list(G0dm = G0dm, Ta =
Ta)) print(g0) Object of class G0
```

Source of meteorological information: prom-

Latitude of source: 37.2 degrees Latitude for calculations: 37.2 degrees

Monthly averages: G0d D0d B0d ene. 2024 2.766 0.941698 1.824302 feb. 2024 3.491 1.247146 2.243854 mar. 2024 4.494 1.671763 2.822237 abr. 2024 5.912 1.931146 3.980854 may. 2024 6.989 2.023364 4.965636 jun. 2024 7.742 1.889994 5.852006 jul. 2024 7.919 1.624064 6.294936 ago. 2024 7.027 1.547591 5.479409 sep. 2024 5.369 1.540708 3.828292 oct. 2024 3.562 1.374513 2.187487 nov. 2024 2.814 1.006959 1.807041 dic. 2024 2.179 0.926737 1.252263

Yearly values: G0d D0d B0d 2024 1835.874 539.386 1296.488 xyplot(g0) Esperando para confirmar cambio de página... ## Aguiar et al.

```
g0 <- calcG0(lat = 37.2, modeRad = 'aguiar', dataRad = G0dm) print(g0) Object of
class G0
```

Source of meteorological information: bd-aguiar

Latitude of source: 37.2 degrees Latitude for calculations: 37.2 degrees

Monthly averages: G0d D0d B0d ene. 2024 2.766 1.120093 1.645907 feb. 2024 3.491 1.390187 2.100813 mar. 2024 4.494 1.912581 2.581419 abr. 2024 5.912 2.407259 3.504741 may. 2024 6.989 2.441780 4.547220 jun. 2024 7.742 2.481260 5.260740 jul. 2024 7.919 2.237407 5.681593 ago. 2024 7.027 2.309847 4.717153 sep. 2024 5.369 1.866052 3.502948 oct. 2024 3.562 1.645131 1.916869 nov. 2024 2.814 1.142760 1.671240 dic. 2024 2.179 1.069351 1.109649

Yearly values: G0d D0d B0d 2024 1839.365 672.0572 1167.308 xyplot(g0) Esperando para confirmar cambio de página... ##Now the G0I component of g0 is used as ##the bdI argument to calcG0 in order to ##test the intradaily correlations of fd-kt

BdI = as.zooI(g0) BdI\$Ta = 25 ##Information about temperature must be contained in BdI g02 j- calcG0(lat = 37.2, calcG0+ modeRad = 'bdI', calcG0+ dataRad = list(lat = 37.2, file = BdI), calcG0+ corr = 'none') print(g02) Object of class G0

Source of meteorological information: bdI-

Latitude of source: 37.2 degrees Latitude for calculations: 37.2 degrees

Monthly averages: G0d D0d B0d ene. 2024 2.766000 1.120093 1.645907 feb. 2024 3.491000 1.390187 2.100813 mar. 2024 4.494000 1.912581 2.581419 abr. 2024 5.912000 2.407259 3.504741 may. 2024 6.989000 2.441780 4.547220 jun. 2024 7.742000 2.481260 5.260740 jul. 2024 7.919000 2.237407 5.681593 ago. 2024 6.708184 2.237773 4.470391 sep. 2024 5.259378 1.841446 3.417912 oct. 2024 3.562000 1.645131 1.916869 nov. 2024 2.814000 1.142760 1.671240 dic. 2024 2.179000 1.069351 1.109649

Yearly values: G0d D0d B0d 2024 1826.193 669.0847 1157.107 g03 j- calcG0(lat = 37.2, calcG0+ modeRad = 'bdI', calcG0+ dataRad = list(lat = 37.2, file = BdI), calcG0+ corr = 'BRL') print(g03) Object of class G0

Source of meteorological information: bdI-

Latitude of source: 37.2 degrees Latitude for calculations: 37.2 degrees

Monthly averages: G0d D0d B0d ene. 2024 2.766000 1.114661 1.651339 feb. 2024 3.491000 1.246190 2.244810 mar. 2024 4.494000 1.988318 2.505682 abr. 2024 5.912000 2.385265 3.526735 may. 2024 6.989000 2.594256 4.394744 jun. 2024 7.742000 2.410585 5.331415 jul. 2024 7.919000 1.939177 5.979823 ago. 2024 6.708184 1.743918 4.964266 sep. 2024 5.259378 1.709437 3.549940 oct. 2024 3.562000 1.604211 1.957789 nov. 2024 2.814000 1.085960 1.728040 dic. 2024 2.179000 1.085982 1.093018

Yearly values: G0d D0d B0d 2024 1826.193 638.0632 1188.13 xyplot(fd ~ kt, data = g03, pch = 19, alpha = 0.3) Esperando para confirmar cambio de página... ## Not run: ##D ##NREL-MIDC ##D ##La Ola, Lanai ##D ##Latitude: 20.76685o North ##D ##Longitude: 156.92291o West ##D ##Elevation: 381 meters AMSL ##D ##Time Zone: -10.0 ##D ##D NRELUrl j- 'http://goo.gl/fFEbN' ##D ##D dat j- read.table(NRELUrl, header = TRUE, sep = ',') ##D names(dat) j- c('date', 'hour', 'G0', 'B', 'D0', 'Ta') ##D ##D ##B is direct normal. We need direct horizontal. ##D dat\$B0 j- dat\$G0 - dat\$D0 ##D ##D ##[http://www.nrel.gov/midc/la\\_ola\\_lanai/instruments.html](http://www.nrel.gov/midc/la_ola_lanai/instruments.html): ##D ##The datalogger program runs using Greenwich Mean Time (GMT), ##D ##data is converted to Hawaiiin Standard Time (HST) after data collection ##D idxLocal j- with(dat, as.POSIXct(paste(date, hour), format = '%m/%d/%Y %H:%M', tz = 'HST')) ##D idx j- local2Solar(idxLocal, lon = -156.9339) ##D ##D NRELMe- teo j- zoo(dat[, c('G0', 'D0', 'B0', 'Ta')], idx) ##D ##D lat = 20.77 ##D ##D g0 j- calcG0(lat = lat, modeRad = 'bdI', dataRad = NRELMeteo, corr = 'none') ##D xy- plot(g0) ##D xyplot(as.zooI(g0), superpose = TRUE) ##D ##D g02 j- calcG0(lat = lat, modeRad = 'bdI', dataRad = NRELMeteo, corr = 'BRL') ##D xyplot(g02) ##D xyplot(as.zooI(g02), superpose = TRUE) ##D xyplot(fd ~ kt, data = g02, pch = 19, cex

```
= 0.5, alpha = 0.5) ##D ##D g03 i- calcG0(lat = lat, modeRad = 'bdI', dataRad =
NRELMeteo, corr = 'CLIMEDh') ##D xyplot(g03) ##D xyplot(as.zooI(g03), superpo-
se = TRUE) ##D xyplot(fd ~ kt, data = g03, pch = 19, cex = 0.5, alpha = 0.5) ##
End(Not run)
```

Warning message: In checkG0Ta(file, maxmin = TRUE) : Ambient temperature data is not available. A new column with a constant value has been added.]]

### A.3. Clases

### A.4. Tests



# Bibliografía

- [ZG05] Achim Zeileis y Gabor Grothendieck. “zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series”. En: *Journal of Statistical Software* 14.6 (2005), págs. 1-27. DOI: [10.18637/jss.v014.i06](https://doi.org/10.18637/jss.v014.i06).
- [Per12] Oscar Perpiñán. “solaR: Solar Radiation and Photovoltaic Systems with R”. En: *Journal of Statistical Software* 50.9 (2012), págs. 1-32. DOI: [10.18637/jss.v050.i09](https://doi.org/10.18637/jss.v050.i09).
- [Uni20] European Union. *NextGenerationEU*. 2020. URL: [https://next-generation-eu.europa.eu/index\\_es](https://next-generation-eu.europa.eu/index_es).
- [BOE22a] BOE. *Real Decreto-ley 10/2022, de 13 de mayo, por el que se establece con carácter temporal un mecanismo de ajuste de costes de producción para la reducción del precio de la electricidad en el mercado mayorista*. 2022. URL: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-7843>.
- [BOE22b] BOE. *Real Decreto-ley 6/2022, de 29 de marzo, por el que se adoptan medidas urgentes en el marco del Plan Nacional de respuesta a las consecuencias económicas y sociales de la guerra en Ucrania*. 2022. URL: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2022-4972>.
- [dem22] Ministerio para transición ecológica y el reto demográfico. *Plan + Seguridad Energética*. 2022. URL: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/seguridad-energetica.html#planSE>.
- [Eur22] Consejo Europeo. *REPowerEU*. 2022. URL: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/eu-recovery-plan/repowereu/>.
- [Hac22] Ministerio de Hacienda. *Mecanismo de Recuperación y Resiliencia*. 2022. URL: <https://www.hacienda.gob.es/es-ES/CDI/Paginas/FondosEuropeos/Fondos-relacionados-COVID/MRR.aspx>.
- [R C23] R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2023. URL: <https://www.R-project.org/>.
- [UNE23] UNEF. “Fomentando la biodiversidad y el crecimiento sostenible”. En: *Informe anual UNEF* (2023). URL: <https://www.unef.es/es/recursos-informes?idMultimediaCategoria=18>.
- [Wan+23] Chris Wanstrath et al. *GitHub*. 2023. URL: <https://github.com/>.
- [Bar+24] Tyson Barrett et al. *data.table: Extension of ‘data.frame’*. R package version 1.15.99, <https://Rdatatable.gitlab.io/data.table>, <https://github.com/Rdatatable/data.table>. 2024. URL: <https://r-datatable.com>.