

Instalación solar fotovoltaica conectada a la red

Daniel Ferri Tomás

Diciembre 2021

Resumen ejecutivo

En este documento se realiza el estudio de una nueva instalación fotovoltaica conectada a la red, situada en el tejado de un domicilio particular en la localidad de Grao de Gandia. Al tratarse de una instalación conectada a la red, la energía se venderá directamente a la red, con lo cual no será necesario el almacenamiento de la energía, ni el estudio del uso de la energía en la vivienda.

Índice

Resumen ejecutivo	1
Índice	2
1. Introducción	4
1.1. Localización de la instalación	4
2. Estudio de viabilidad	5
2.1. Costes	5
2.2. Ingresos	9
2.3. Análisis costes ingresos	15
3. Diseño del circuito eléctrico	16
Referencias	16
Anexo A	17

Índice de figuras

1.	Ubicación de la instalación fotovoltaica	4
2.	Datasheet JAM54S30 405	7
3.	Datasheet Growatt MIN 2500TL-XE	8
4.	Estudio energía PVGIS	9
5.	Mapa catastral	10
6.	Simulación en Unity	11
7.	Raycasts proyectados desde la placa solar	12
8.	Minutos de sol diarios	13
9.	Radiación solar incidente	14
10.	Circuito eléctrico instalación fotovoltaica	16

Índice de cuadros

1.	Placas solares disponibles	5
2.	Minutos de sol y eficiencia según ubicación	14

1. Introducción

Para diseñar una instalación fotovoltaica, los pasos que se van a seguir son:

- Estudio de viabilidad
- Diseño del circuito eléctrico

Al tratarse de un trabajo, se va a realizar el estudio y diseño completo a pesar de que la instalación sea inviable en la ubicación elegida.

1.1. Localización de la instalación

La instalación irá instalada en el tejado de la vivienda situada en Carrer Ripoll, 5, 46730 Grau de Gandía, València.

Coordenadas: $38^{\circ}59'33,79''$ Norte, $09^{\circ}54,66''$ Oeste

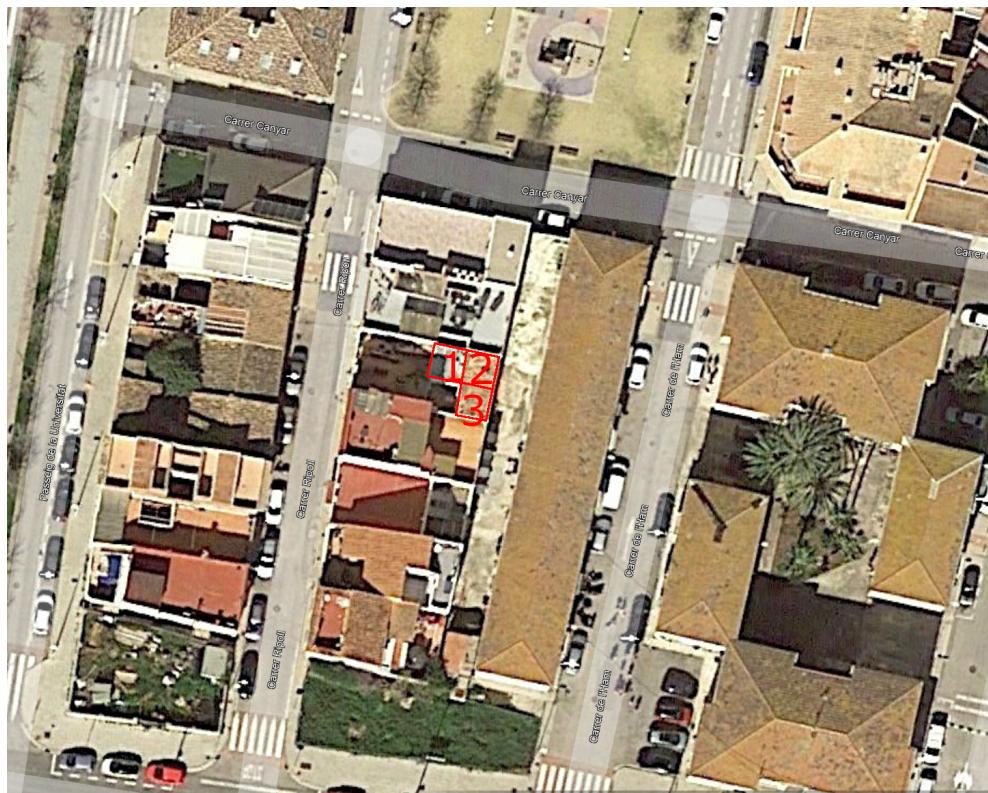


Figura 1: Ubicación de la instalación fotovoltaica

En la figura 1 se puede observar la ubicación de la vivienda donde irá la instalación fotovoltaica. Los tres cuadrados rojos son las tres ubicaciones donde se plantea realizar la instalación, que son aproximadamente cuadrados de 3500mm de lado.

Uno de los problemas que se pueden observar en la propia vista aérea es el edificio directamente al sur, que es más alto que la propia instalación, y proyecta sombras a lo largo del día (por la tarde, especialmente en invierno). Esto se tiene en cuenta a la hora del estudio de viabilidad, al no recibir la radiación solar óptima.

2. Estudio de viabilidad

El primer punto al estudiar una instalación fotovoltaica es si esta instalación será rentable en el transcurso de su vida útil. Para esto, es necesario calcular los diferentes costes de la instalación (principalmente compra de materiales e instalación) y compararlos con los ingresos que generará (principalmente por la venta de la energía).

2.1. Costes

Los costes serán únicamente los de los materiales, ya que planeamos realizar la instalación personalmente. El primer punto a tener en cuenta serán las placas solares en sí. Un estudio de las diferentes placas solares disponibles en el momento de este reporte proporciona los siguientes datos:

Modelo	Tam (mm x mm)	Wp	Pre (€)	Wp/€	Wp/m ²
ESPHSC380	1755x1038	380	161.89	2.34	208.59
ESPMC160	1482x676	160	82.62	1.93	159.70
ESPMC200	1332x992	200	114.83	1.74	151.36
ESPMC340	1956x992	340	165.62	2.05	175.22
ESPSC030	388x674	30	41.65	0.72	114.71
ESPSC180	1482x676	180	107.18	1.67	179.67
JAM54S30 400	1722x1134	400	160.78	2.48	204.83
JAM54S30 405	1722x1134	405	161.51	2.50	207.40
JAM60S20 380	1776x1052	380	162.96	2.33	203.38
JAM72S20 455	2112x1052	455	219.43	2.07	204.78
JAM72S20 460	2112x1052	460	231.5	1.98	207.03
JKM570M-7RL4	2411x1134	570	292.88	1.94	208.48

Cuadro 1: Placas solares disponibles

Con los datos de la figura 1 se observa que las placas más eficientes tanto en potencia por euro como en potencia por superficie son las placas ESPHSC380 [1], JAM54S30 400 [2], JAM54S30 405 [2] y JAM60S20 380 [3]. Por tamaño, todas estas placas permitirían colocar una distribución de 2 placas a lo ancho y 3 a lo alto, aunque las placas ESPHSC380 y JAM60S20 380 sobresalen ligeramente del área de 3500mm de lado.

Todas estas placas se tratan de placas solares mediante tecnología de silicio monocristalino, y unas garantías de fabricación de 12 años, de producción al 90 % de 12 años, y de producción al 80 % de 25 años.

Al ajustar mejor al tamaño disponible, y siendo el resto de características muy comparables, se decide por la placa JAM54S30 405 [2]. Esto tendrá por lo tanto un coste de 970€ por la compra de las 6 placas, y una potencia pico total de 2430Wp.

MECHANICAL DIAGRAMS		SPECIFICATIONS	
		Cell	Mono
		Weight	21.5kg±3%
		Dimensions	1722±2mm×1134±2mm×30±1mm
		Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC) , 12 AWG(UL)
		No. of cells	108(6x18)
		Junction Box	IP68, 3 diodes
		Connector	QC 4.10(1000V) QC 4.10-35(1500V)
		Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+)/400mm(-); Landscape: 1200mm(+)/1200mm(-)
		Packaging Configuration	36pcs/Pallet, 936pcs/40ft Container

Remark: customized frame color and cable length available upon request

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC						
TYPE	JAM54S30 -390/MR	JAM54S30 -395/MR	JAM54S30 -400/MR	JAM54S30 -405/MR	JAM54S30 -410/MR	JAM54S30 -415/MR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	390	395	400	405	410	415
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	36.85	36.98	37.07	37.23	37.32	37.45
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	30.64	30.84	31.01	31.21	31.45	31.61
Short Circuit Current(Isc) [A]	13.61	13.70	13.79	13.87	13.95	14.02
Maximum Power Current(Imp) [A]	12.73	12.81	12.90	12.98	13.04	13.13
Module Efficiency [%]	20.0	20.2	20.5	20.7	21.0	21.3
Power Tolerance	0~+5W					
Temperature Coefficient of Isc(α_{Isc})	+0.045%/ $^{\circ}$ C					
Temperature Coefficient of Voc(β_{Voc})	-0.275%/ $^{\circ}$ C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ_{Pmp})	-0.350%/ $^{\circ}$ C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25 $^{\circ}$ C, AM1.5G					

Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT							OPERATING CONDITIONS	
TYPE	JAM54S30 -390/MR	JAM54S30 -395/MR	JAM54S30 -400/MR	JAM54S30 -405/MR	JAM54S30 -410/MR	JAM54S30 -415/MR	Maximum System Voltage	1000V/1500V DC
Rated Max Power(Pmax) [W]	294	298	302	306	310	314	Operating Temperature	-40 $^{\circ}$ C ~+85 $^{\circ}$ C
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	34.62	34.75	34.88	35.12	35.23	35.37	Maximum Series Fuse Rating	25A
Max Power Voltage(Vmp) [V]	28.87	29.08	29.26	29.47	29.72	29.89	Maximum Static Load Front*	5400Pa(112lb/ft ²)
Short Circuit Current(Isc) [A]	10.89	10.96	11.03	11.10	11.16	11.22	Maximum Static Load Back*	2400Pa(50lb/ft ²)
Max Power Current(Imp) [A]	10.18	10.25	10.32	10.38	10.43	10.50	NOCT	45±2 $^{\circ}$ C
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20 $^{\circ}$ C, wind speed 1m/s, AM1.5G						Safety Class	Class II
							Fire Performance	UL Type 1

Figura 2: Datasheet JAM54S30 405

Una vez decididas las placas, es necesario un inversor para transformar la electricidad en continua que generan las placas en energía aceptable para la red eléctrica, tanto en voltaje, frecuencia y fase. Para ello, se decide el inversor Growatt MIN 2500TL-XE [4], que tiene un coste de 564€.

Datasheet	MIN 2500TL-X
Input Data	
Max. recommended PV power (for module STC)	3500W
Max. DC voltage	500V
Start voltage	100V
MPP work voltage range/ nominal voltage	60V-500V /360V
Max. input current	12.5A/12.5A
Max. short-circuit current	16A/16A
Number of independent MPP trackers / strings per MPP tracker	2/1
Output (AC)	
Rated AC output power	2500W
Max. AC apparent power	2500VA
Max. output current	11.3A
AC nominal voltage	230V(160V-300V)
AC grid frequency	50Hz/60Hz, ± 5Hz
Adjustable power factor	0.8leading... 0.8lagging
THDi	<3%
AC connection	Single phase
Efficiency	
Max. efficiency	98.2%
Euro weighted efficiency	97.1%
MPPT efficiency	99.9%

Figura 3: Datasheet Growatt MIN 2500TL-XE

Finalmente, la estructura para sujetar la instalación será necesaria construirla. Para ello, lo más adecuado será utilizar perfiles de acero galvanizado, de 30x30x1,5mm y 3m de largo, al ser muy estandard y cuadrará con las medidas de la instalación. Para nuestra instalación serán necesarios 9 perfiles, con un coste total de 90€.

Esto lleva el coste total de la instalación (sin contar la mano de obra ni herramientas, ya que se realizará personalmente) a un total de 1624€. Tampoco se ha contado aquí los diferentes materiales necesarios para la instalación eléctrica (cables y conectores), ya que o vienen incluidos con las otras compras, o se disponen ya, y en todo caso son de coste reducido.

2.2. Ingresos

Los ingresos en la instalación fotovoltaica corresponden mayoritariamente con el precio de la energía vendida, o alternativamente por el precio de la energía que ha dejado de ser necesario comprar ya que las placas solares la han proporcionado. Utilizando la herramienta de PVGIS de la unión europea [5], para la ubicación e instalación elegidas, obtenemos los siguientes resultados.

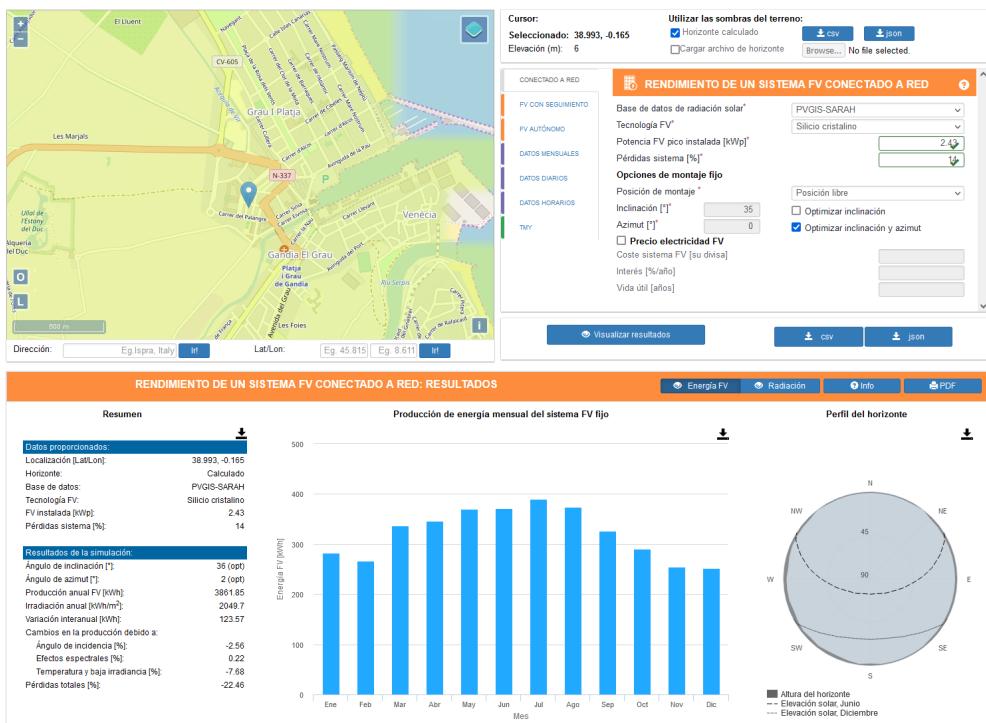


Figura 4: Estudio energía PVGIS

La herramienta calcula una producción anual de $3861,85\text{kWh}$. A un coste de energía aproximado de $0,15\text{€}/\text{kWh}$, esto corresponde a una producción anual de 580€

Como se ha visto en la figura 1, la ubicación no es idónea, y el edificio adyacente añade sombras a la ubicación de la instalación. Podemos obtener los mapas de ambos edificios de la información del catastro:

Vivienda de la instalación parcela 5699205YJ4159N0001JD [6]

Vivienda de sombra parcela 5699204YJ4159N0001ID [7]

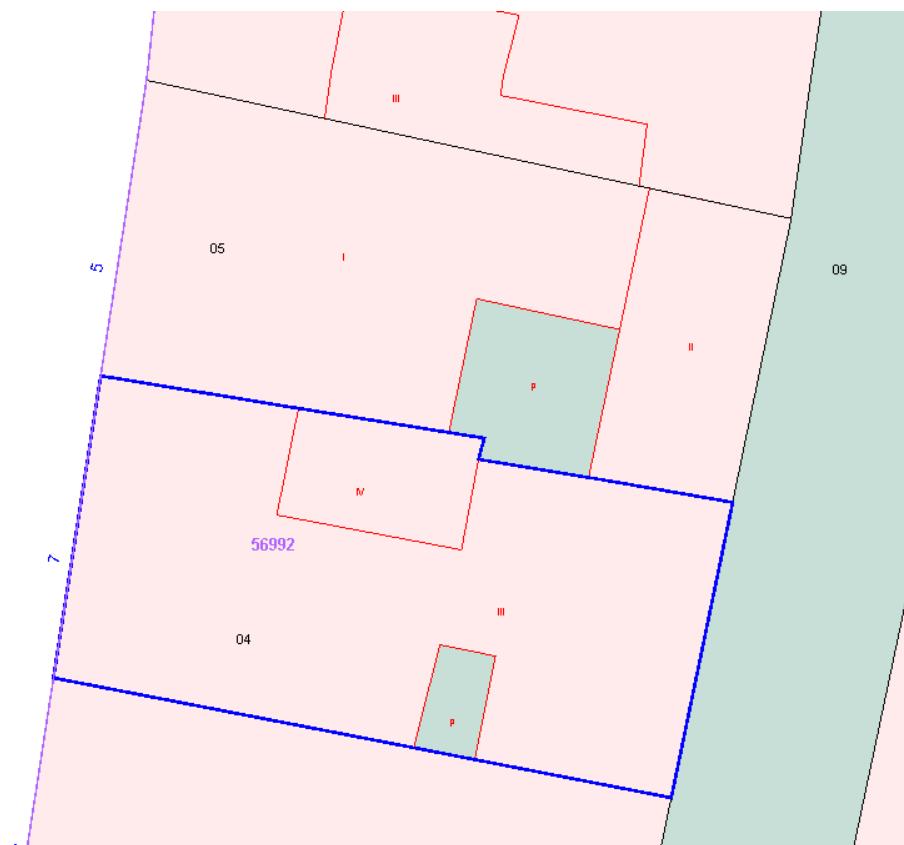


Figura 5: Mapa catastral

Con estos datos, y midiendo las alturas físicamente, podemos crear un modelo de las dos casas en Unity, y simular la posición del sol a lo largo del año, para calcular el porcentaje de la radiación solar que se pierde en cada una de las tres posibles ubicaciones.

Esta herramienta está describida en detalle en el Anexo A.

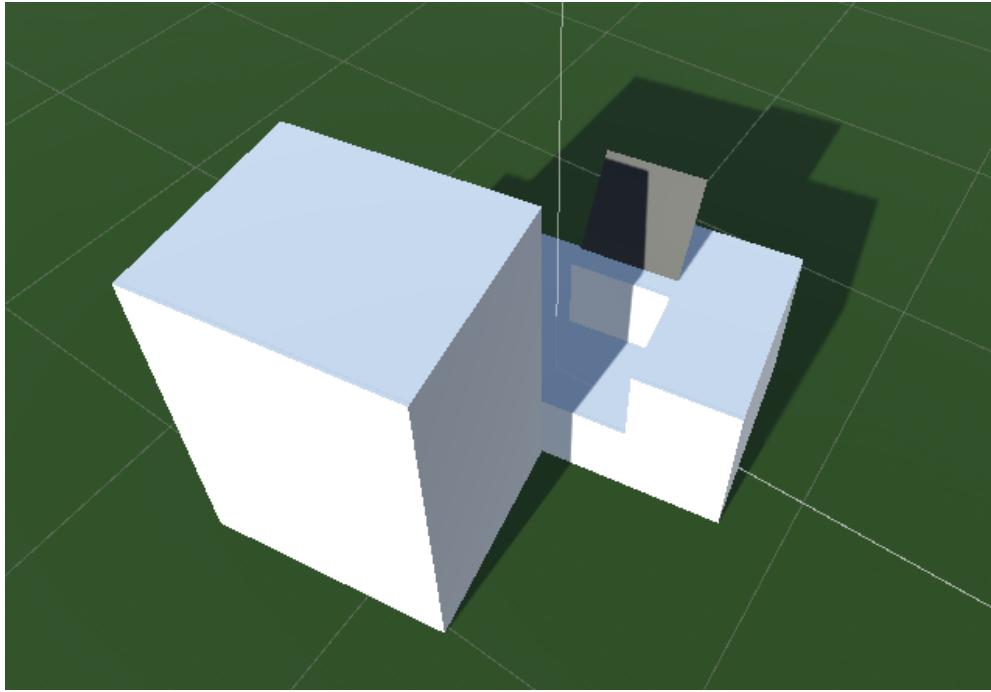


Figura 6: Simulación en Unity

La figura 6 corresponde al mediodía del solsticio de invierno

El angulo del sol para cada una de las horas y dias se puede obtener mediante las siguientes fórmulas:

$$\cos \theta_s = \sin \alpha_s = \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos h \quad (1)$$

$$\cos \phi_s = \frac{-\sin h \cos \delta}{\sin \theta_s} \quad (2)$$

Where:

$$\sin \delta = \sin(-23,44^\circ) \cdot \sin \left(\frac{360^\circ}{365} \cdot (N + 10) \right) \quad (3)$$

$$\theta_s \rightarrow \text{angulo zenithal solar} \quad (4)$$

$$\alpha_s \rightarrow \text{angulo de elevación solar} \quad (5)$$

$$\phi_s \rightarrow \text{angulo azimutal solar} \quad (6)$$

$$h \rightarrow \text{angulo horario} \quad (7)$$

$$\Phi \rightarrow \text{latitud local} \quad (8)$$

$$N \rightarrow \text{dia del año} \quad (9)$$

Con la simulación, podemos calcular fácilmente los minutos de sol que se pierden en las placas solares por la sombra proyectada. Para realizar este cálculo, simplemente proyectamos raycasts desde la superficie de la placa solar hacia la dirección inversa a la de los rayos solares incidentes, y se anota si el raycast ha chocado con algo, ya sea la propia placa solar (no debería ocurrir), el edificio de enfrente (cuando proyecta la sombra) o el propio suelo de la simulación (de noche el suelo está bajo el horizonte). Para la simulación, se aproxima que el sol se encuentra en el infinito, que la superficie de la tierra es plana, y que no hay otros obstáculos que puedan provocar sombras. El error añadido por estas aproximaciones es completamente ignorable. Se realizan un total de 225 raycasts repartidos en cuadrícula a lo largo de la superficie de la placa solar para cada uno de los períodos simulados, que son de 1 minuto, lo cual significa que se simulan 525,600 posiciones del sol, con un total de 118,260,000 raycasts por cada una de las configuraciones de la placa solar.

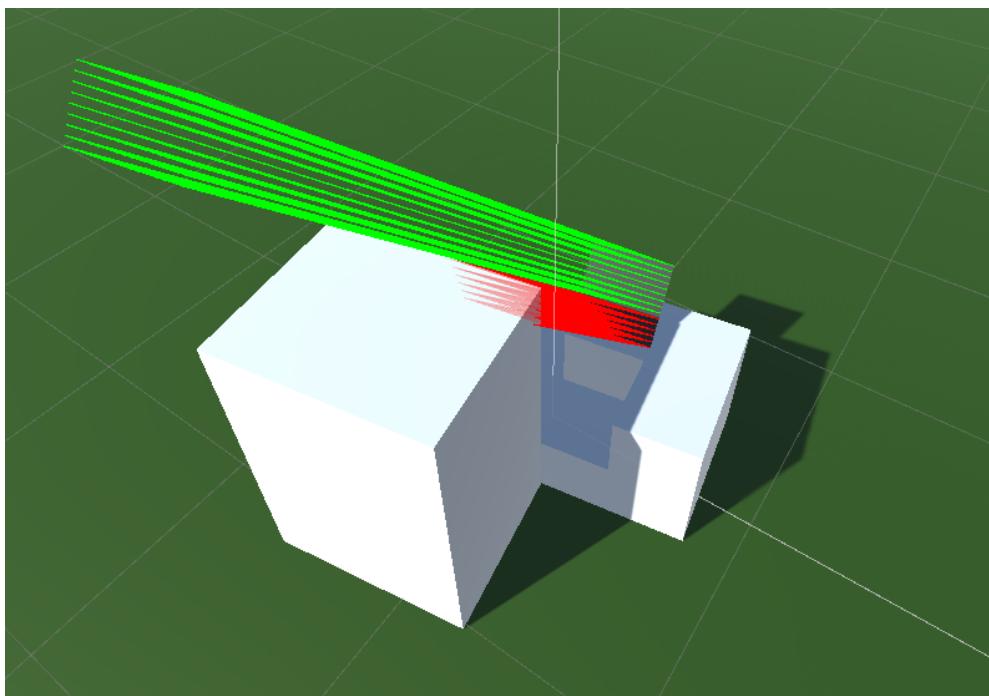


Figura 7: Raycasts proyectados desde la placa solar

En la figura 7 se observan los diferentes raycasts proyectados desde la placa solar, con los raycasts que chocan con algún obstáculo en rojo, y los raycasts que no chocan con nada en verde

Con esto, calculamos los minutos de sol que llegan a la placa solar en cada una de las configuraciones

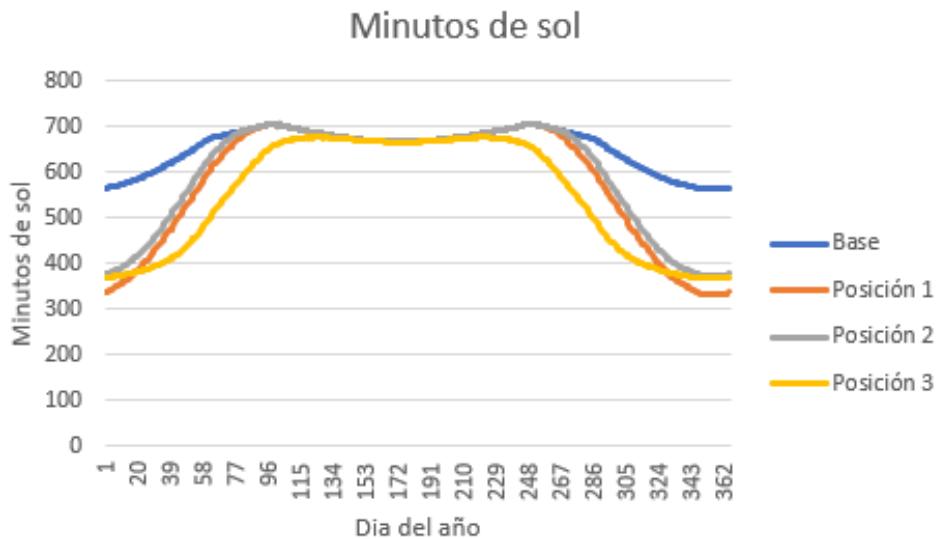


Figura 8: Minutos de sol diarios

Las posiciones de las placas solares se pueden observar en la figura 1.

Como se puede observar en la figura 8, en las posiciones 1 y 2 se pierden casi ligeramente menos de 4 horas al día de sol en invierno, con sol durante todo el día en verano, ya que el sol está más vertical. En la posición 3, las horas de sol son menores durante todo el año, ya que está lo suficientemente cerca como para tener sombra hasta en verano.

Sin embargo, las horas de sol no son directamente proporcionales a la cantidad de radiación solar que llega a las placas solares. Para obtener la cantidad de radiación solar, es necesario calcular para cada uno de los períodos calculados el producto escalar del vector que define la superficie de las placas solares (con el sentido invertido) con el vector que define la dirección de los rayos solares . Calculando esto, obtenemos los siguientes datos:

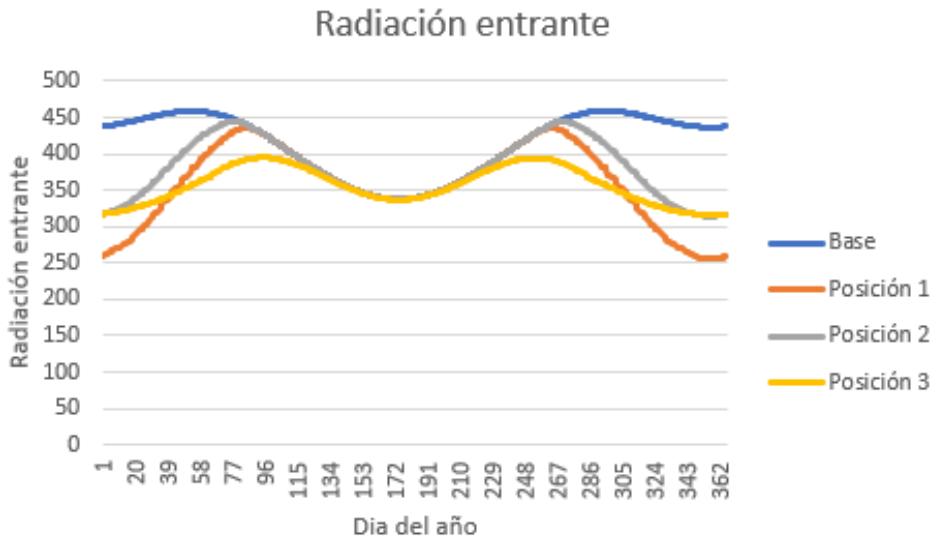


Figura 9: Radiación solar incidente

La figura 9 muestra la radiación solar que llega a las placas solares. Mientras que la gráfica no está en ninguna unidad, si que es útil para comparar cada una de las posiciones con la base. La forma ondulada de la gráfica base es debido al ángulo de las placas solares, que está colocado a 36° según lo optimizado por la herramienta PVGIS, en la figura 4.

Con esto podemos calcular la siguiente tabla:

Nombre	Minutos sol diarios (m)	Rad entrante (respecto a base)
Basa	728.49	100 %
Posición 1	657.98	87.44 %
Posición 2	668.91	91.52 %
Posición 3	604.59	85.81 %

Cuadro 2: Minutos de sol y eficiencia según ubicación

Este resumen nos confirma finalmente que las ubicación óptima para colocar la instalación será la posición 2, con una cantidad de radiación solar entrante del 91 % con respecto a si no hubiese sombras. La cantidad de energía recogida a lo largo del año no será exactamente el 91 % de lo calculado por PVGIS, ya que los periodos de sombras están ubicados en los meses invernales, durante los cuales la eficiencia de las placas solares es ligeramente superior al haber una temperatura ambiental menor, al mismo tiempo que

estos meses suelen tener un tiempo con ligeramente más nubes, lo cual reduce la radiación que realmente llega a las placas.

Sin embargo, todos estos factores tendrán un efecto final bastante reducido, y el calculo realizado por PVGIS es aproximado de todas formas basado en información histórica del tiempo, con lo que se puede tomar la aproximación del 91 % directamente.

Con esto, la producción anual queda reducida a 528€.

Otra fuente de ingresos sería la reaprovechación o reventa de los materiales una vez acabada la vida útil de la instalación. Un ejemplo de esto sería la reaprovechación de la estructura para la siguiente instalación fotovoltaica, o la reaprovechación o reventa de las placas solares que sigan funcionando adecuadamente después del fin de la vida útil de la instalación.

Sin embargo, estos ingresos se van a ignorar a la hora de realizar el análisis de costes ingresos.

2.3. Análisis costes ingresos

Si suponemos una vida útil de la instalación de 10 años (ya que las placas solares tienen una garantía de eficiencia de 12 años, y el inversor de 10 años), obtenemos un beneficio total al final de la vida útil de la instalación de:

$$\text{Beneficio} = \text{Ingresos} \cdot \text{tiempo} - \text{Costes} = 580 \cdot 10 - 1624 = 4176\text{€} \quad (10)$$

Esto corresponde a unas ganancias porcentual (réido) de:

$$\text{Redito} = \text{Beneficio}/\text{Inversion} = 4176/1624 = 257\% \quad (11)$$

Teniendo esto, podemos calcular el TIN de esta inversión:

$$\text{TIN} = \text{Redito}/\text{tiempo} = 2,57/10 = 25,7\% \quad (12)$$

Finalmente, podemos calcular el TAE

$$\text{TAE} = \left(1 - \frac{\text{TIN}}{f}\right)^f = \left(1 - \frac{0,257}{1/10}\right)^{1/10} = 13,6\% \quad (13)$$

Comparando esto con una inversión genérica (por ejemplo, en un indice del S&P 500, que tiene un TAE del 9.2 % [8]), consideramos que esta inversión es adecuada.

Utilizando la cantidad reducida por la sombra del edificio, tal cual se calcula en el apartado anterior, el TAE final queda en

$$\text{TAE} = \left(1 - \frac{0,225}{1/10}\right)^{1/10} = 12,5\% \quad (14)$$

Con esto, seguimos considerando que la inversión es adecuada.

3. Diseño del circuito eléctrico

El circuito eléctrico para conectar las placas solares es muy sencillo. Como las placas solares son de 12 voltios, pero el inversor es de 24 voltios, será necesario colocar las placas solares en serie de dos en dos, para obtener los 24 voltios que necesita el transformador. Los tres sets de placas se conectarán directamente en paralelo y directamente al inversor para que transforme la energía. El inversor irá directamente conectado a la red eléctrica.

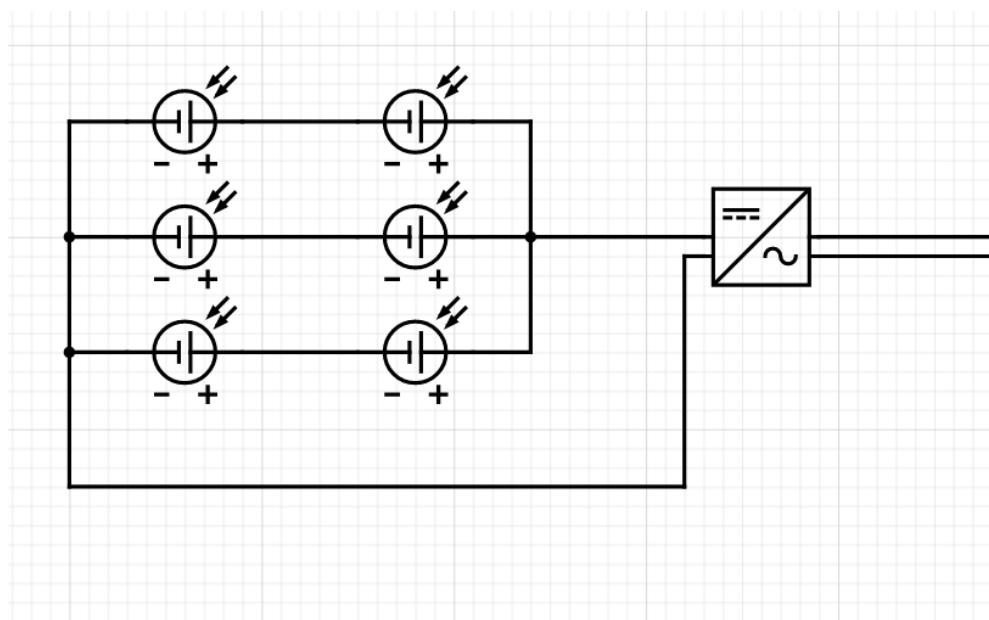


Figura 10: Circuito eléctrico instalación fotovoltaica

Al no necesitar almacenar la energía, no es necesario incluir batería ni regulador para la batería, siendo capaz el inversor elegido de realizar toda la conversión y adaptación necesarias.

Referencias

- [1] Ficha técnica ESPHSC380 [http://www.erasolar.com.cn/archiv/DatasheetofESPHSC-60HC355-380W\(166x166\).pdf](http://www.erasolar.com.cn/archiv/DatasheetofESPHSC-60HC355-380W(166x166).pdf)
- [2] Ficha técnica JAM54S30 <https://www.jasolar.com//uploadfile/2021/0602/20210602103135684.pdf>
- [3] Ficha técnica JAM60S20 <https://www.jasolar.com//uploadfile/2020/1013/20201013031958494.pdf>

- [4] Ficha técnica Growatt MIN 2500-6000TL <https://www.growatt.es/upload/file/contents/2019/07/5d1b0963721c5.pdf>
- [5] Herramienta PVGIS https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#MR
- [6] Información catastro parcela 5699205YJ4159N0001JD <https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx?del=46&mun=133&refcat=5699205YJ4159N0001JD&final=&ZV=N0&anyoZV=>
- [7] Información catastro parcela 5699204YJ4159N0001ID <https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx?del=46&mun=133&refcat=5699204YJ4159N0001ID&final=&ZV=N0&anyoZV=>
- [8] S&P 500 Standard Deviation <https://piercube.com/sp-500-standard-deviation/>

Anexo A:
Herramienta para la simulación de la
irradiación solar en instalaciones fotovoltaicas
con sombra

Daniel Ferri Tomás

Enero 2022

Índice

Índice	1
1. Objetivos	3
2. Diseño de la solución	3
3. Manual de usuario	10
3.1. Instalación	10
3.2. Configuración del entorno y definición de edificios	12
3.3. Ejecución y extracción de resultados	13
Referencias	14

Índice de figuras

1.	Algoritmo principal	5
2.	Parametros de la simulación	6
3.	Asignar el ángulo al sol según día y hora	7
4.	Calculo del ángulo	8
5.	Calculo de la incidencia solar	9
6.	Vista del jerarquía de la escena en Unity	11
7.	Vista del inspector en Unity	12
8.	Vista del editor de Unity	13

1. Objetivos

Determinar la posición y orientación de las placas fotovoltaicas es un factor clave en el diseño de este tipo instalaciones. Afortunadamente, existen varias herramientas que nos permiten obtener la orientación óptima conocida la latitud.

No obstante, este tipo de herramientas no consideran la posibilidad de que los edificios cercanos obstruyan los rayos del sol, ocasionando una perdida de rendimiento en la generación de electricidad.

Esta problemática es clave en la instalación que pretendemos resolver. Al existir un edificio de gran altura al sur de la vivienda donde se va a realizar la instalación, durante muchas horas del día las placas van a estar a la sombra. Disponer de una herramienta de esta clase va a ser de gran importancia para determinar si la instalación va a tener una irradiación suficiente y a qué horas vamos a disponer de generación eléctrica.

Tras una revisión por Internet no encontramos una herramienta que nos permita resolver este problema. Por lo tanto, hemos decidido desarrollar un software que permita resolver esta problemática.

Los objetivos que la herramienta a desarrollar son los siguientes:

- Ha de permitir la definición geométrica de los edificios cercanos que puedan hacer sombra en las placas.
- Ha de permitir configurar la posición de la vivienda. En nuestro caso solo va a ser necesaria la latitud. La longitud va a ser irrelevante dado que no se tendrá en cuenta las condiciones meteorológicas de la zona.
- Ha de permitir definir la posición de las placas dentro de la vivienda. De esta forma se podrá determinar la posición optima, donde las placas van a tener una menor sombra.
- A partir de la información anterior ha de obtener la cantidad de irradiación solar que se obtiene. Este cálculo ha de detallarse tanto por días del año como por horas del día.

2. Diseño de la solución

La primera cuestión para resolver es si vamos a realizar un cálculo analítico para resolver el problema o una simulación. Obtener una solución analítica parece demasiado compleja, dado que los edificios que pueden dar sombra podrían tener una forma arbitraria. Por lo tanto, nos vamos a decantar por realizar una simulación.

La solución que planteamos va a consistir en obtener el azimut y la altura del sol a lo largo de todo el año, con un periodo pequeño (por ejemplo, de un minuto). A partir de la posición del sol, la aplicaremos en la geometría de los edificios para determinar el porcentaje de la placa solar que queda a la sombra. De esta forma se podrá determinar la perdida de irradiación en función del día del año, e incluso según la hora del día.

Para realizar esta simulación hemos escogido el entorno Unity. Aunque esta plataforma se suele utilizar en el diseño de videojuegos, puede ser fácilmente adaptada para el cálculo de este tipo de simulaciones. Una de las ventajas es que nos va a permitir definir la geometría de los edificios de una forma muy sencilla. Por otra parte, Unity dispone de un entorno interactivo donde vamos a poder representar la geometría y los rayos del sol para cada hora del día. Gracias a este tipo de representación vamos a poder validar de forma muy sencilla si lo que estamos calculando tiene sentido y no estamos cometiendo errores en el cálculo (ver vídeos con las simulaciones).

Para determinar el porcentaje de la placa de sol que está a la sombra vamos a trazar un total de 15x15 rayos desde la placa hasta el sol. Los rayos se distribuyen en la placa en una cuadrícula de 15x15. Si alguno de estos rayos atraviesa un edificio se considerará que está parte de la placa está a la sombra. Dividiendo el número de rayos en sombra con respecto del total obtendremos el porcentaje de la placa que está a la sombra.

Una última decisión que nos hemos planteado es como determinar la posición del sol con respecto a la placa. La primera posibilidad consistiría en determinar que el sol se encuentra en el infinito y a partir de la latitud, el día del año y la hora obtener la azimut y altura del sol. Para estos cálculos utilizamos las ecuaciones 1 y 2 de la memoria. La segunda posibilidad consistiría en considerar que el sol es un punto situado a 150.000.000 Km de una esfera de 6.300 Km de radio y una inclinación axial de 23,43º que gira alrededor del sol con una órbita circular. En un punto adecuado de la esfera que representa la tierra en la latitud adecuada se situaría la geometría de los edificios perpendicularmente a la superficie. Esta segunda solución tendría la ventaja de que los cálculos a realizar son mucho más sencillos, solo hay que girar la tierra alrededor del sol a lo largo de un año y sobre si misma cada 24 horas. No obstante, esta solución presenta un problema con la precisión de los números reales que utiliza el motor de física Unity (float de 32 bits). Aunque este problema podría resolverse usando algunas estrategias, finalmente decidimos usar la primera estrategia.

```

public float latitude = 39;
public float day = 0;
public float hour = -12;
public GameObject sol;
public GameObject placas;
private const float axialTilt = 23.439f;
private float[] results = new float[365 * 24 * 60];
void Start() {
    for (int i = 0; i < results.Length; i++) {
        hour += 1f / 60f;
        if (hour >= 12) {
            hour -= 24;
            day += 1;
        }
        SetDayHour(day + (hour / 24), hour);
        results[i] = GetPercentageLight();
    }
    // Save results to file
    string path = Application.dataPath + "/results.txt";
    System.IO.File.WriteAllText(path, string.Join("\n", results));
}

```

Figura 1: Algoritmo principal

Comenzamos declarando las variables globales. La primera, latitude, corresponde a la latitud donde se encuentra la Vivienda. La segunda, day, es día en que comenzará la animación. Ha de tener un valor entre 0 y 364. La variable hour representa la hora del día, tomando valores de -12 a +12. El valor 0 corresponde al medio día. El objeto sol va a representar la dirección en que incide los rayos del sol en la escena. Finalmente, placas, representará la posición de las placas solares.

Hay que destacar que las cinco variables tienen el modificador public. Esto hace que cuando seleccionemos el objeto Main Camera, en la ventana inspector se mostrará sus valores y se permitirá que el usuario pueda configurarlos:

Latitude	39
Day	0
Hour	-12
Visualize	<input checked="" type="checkbox"/>
Sol	Directional Light
Placas	Placas1

Figura 2: Parámetros de la simulación

Las siguientes dos variables son axialTilt, que define la inclinación axial de la tierra y result, que corresponde a un array con tantos elementos como minutos tienen un año. En result se almacenará en índice de irradiación solar en la placa para cada uno de estos minutos. Los valores almacenados están comprendidos entre 0 y 1.

El algoritmo principal comienza con un bucle que recorrerá todos los minutos de un año. Para cada pasada, añadimos a la hora una fracción correspondiente a un minuto. En caso de que la hora alcance la medianoche (en el formato utilizado este valor es 12) añadiremos 1 al día y restaremos 24 a la hora (que pasará a -12). El método SetDayHour() tiene como objetivo obtener la dirección del sol, para un día y una hora determinada. Como salida la variable sol va a ser modificada. Su código es explicado a continuación. Puede parecer extraño que en lugar de pasar el día como un valor entero, este es transformado en un valor continuo según la hora del día. Calcularlo de esta manera va a permitir obtener un cálculo más preciso. A continuación, se llama al método GetPercentageLight() que obtendrá el índice de radiación solar en las placas según la dirección del sol que acabamos de fijar. El resultado se guarda en el array y se pasa a calcular el siguiente minuto. Las dos últimas líneas guardan el array con los resultados en el fichero results.txt. Este fichero podrá ser exportado a otras aplicaciones, como una hoja de cálculo, para el análisis de los datos o la representación de gráficas.

```

void SetDayHour(float day, float hour) {
    float anglex = GetZenith(day, hour) * Mathf.Rad2Deg;
    float angley = GetAzimuth(day, hour) * Mathf.Rad2Deg;
    float angleybef = GetAzimuth(day, hour - 0.1f) * Mathf.Rad2Deg;
    if (angleybef < angley) {
        angley = 180 - angley;
    }
    Vector3 rot = sol.transform.eulerAngles;
    rot.x = 90 - anglex;
    rot.y = -angley;
    sol.transform.eulerAngles = rot;
}

```

Figura 3: Asignar el ángulo al sol según día y hora

Las dos primeras líneas obtienen la altura y azimut del sol, dado el día y la hora correspondiente. Luego se multiplican por una constante para transformar los ángulos a radianes. Las siguientes líneas permiten resolver un error en el código. La función arcocoseno, utilizada en el método GetAzimuth(), tiene dos posibles soluciones, sin embargo, siempre nos devuelve ángulos del 1er y 4º cuadrante. Para determinar que hemos de devolver la solución que se encuentra en el 2º y 3er cuadrante, comprobamos que el azimut está decreciendo. Esto no es posible en el hemisferio norte, algo faya y la forma de que el azimut siga aumentando es cambiar a la solución del siguiente cuadrante (180-ángulo). Se trata de una solución provisional mientras tratamos de obtener una solución al problema más elegante. Las últimas líneas del método realizan una transformación de coordenadas para adecuarla a las que necesita Unity. Dado el zenith solar se calcula la altura solar, y es necesario invertir el azimuth.

Los siguientes métodos permite obtener la azimut y la altura para un día y una hora determinada. También se incluyen dos métodos auxiliares utilizados por estos:

```

float GetDeclination(float day) {
    return -axialTilt * Mathf.Deg2Rad *
        Mathf.Cos(
            (2 * Mathf.PI / 365) *
            (day + 10));
}

float GetHourAngle(float hour) {
    return hour * 2 * Mathf.PI / 24;
}

float GetZenith(float day, float hour) {
    float hourAngle = GetHourAngle(hour);
    float declination = GetDeclination(day);
    return Mathf.Acos(
        Mathf.Sin(latitude * Mathf.Deg2Rad) *
        Mathf.Sin(declination) +
        Mathf.Cos(latitude * Mathf.Deg2Rad) *
        Mathf.Cos(declination) *
        Mathf.Cos(hourAngle)
    );
}

float GetAzimuth(float day, float hour) {
    float hourAngle = GetHourAngle(hour);
    float declination = GetDeclination(day);
    float zenith = GetZenith(day, hour);
    float azi = Mathf.Asin((
        -Mathf.Sin(hourAngle) *
        Mathf.Cos(declination)) /
        Mathf.Sin(zenith)
    );
    return azi;
}

```

Figura 4: Calculo del ángulo

Este código corresponde a las ecuaciones 1 a 9 incluidas en la memoria. Para terminar, incluimos el método GetPercentageLight() que obtiene el índice de radiación solar en la placa dado el ángulo del sol:

```

float GetPercentageLight() {
    int side = 15;
    int inShadow = 0;
    Vector3 direction = -sol.transform.forward;
    Vector3 pRight = placas.transform.right *
                      placas.transform.localScale.x;
    Vector3 pUp = placas.transform.up *
                  placas.transform.localScale.y;

    float dotProduct = Vector3.Dot(
        -direction.normalized,
        placas.transform.forward.normalized);
    if (dotProduct < 0) {
        inShadow = side * side;
    } else {
        for (int i = 0; i < side; i++) {
            for (int j = 0; j < side; j++) {
                Vector3 origin = placas.transform.position +
                    Right * ((i - (side / 2)) / (side - 1f)) +
                    pUp * ((j - (side / 2)) / (side - 1f));
                RaycastHit hit;
                if (Physics.Raycast(origin, direction, out hit)) {
                    Debug.DrawRay(origin, direction * hit.distance,
                                  Color.red, 0.05f, true);
                    inShadow++;
                } else {
                    Debug.DrawRay(origin, direction * 20,
                                  Color.green, 0.05f, true);
                }
            }
        }
    }
    return (1f - (inShadow / (1f * side * side))) * dotProduct;
}

```

Figura 5: Calculo de la incidencia solar

Comenzamos definiendo la variable `side`, que indica el lado de la cuadrícula de raycasts que lanzaremos desde la placa hacia el sol. Con un valor igual a 15 estaremos definiendo una cuadrícula de 15x15. En la variable `inShadow`

calcularemos cuantos de estos rayos están a la sombra. De esta forma podremos obtener el porcentaje de placa a la sombra por medio de la operación $\text{inShadow}/(15*15)$.

A continuación, definimos tres vectores que representan la dirección de los rayos solares (invertida, ya que realizamos los cálculos desde la placa hacia el cielo), y los vectores derecha y arriba de la placa, para colocar el principio de los raycasts que se van a calcular.

El siguiente cálculo consiste en obtener en dotProduct en índice de radiación teniendo en cuenta el ángulo de incidencia del sol en la placa mediante el producto escalar de los rayos solares con el vector inverso que define la superficie de la placa solar. Si el valor es menor que cero, podemos considerar que todos los rayos están a la sombra, ya que significa que los rayos solares están incidiendo en la placa desde detrás.

En caso contrario se realza un bucle para trazar los 15×15 rayos a la placa. El bucle comienza obteniendo la posición del rayo en la placa. A continuación, se traza un rayo desde esta posición, siguiendo la dirección del sol y se verifica con el motor de física si el rayo atraviesa con algún cuerpo sólido. En caso afirmativo, se dibuja el rayo de color rojo y se incrementa `inShadow`. En caso negativo, solo se dibuja el rayo, pero esta vez en color verde.

El método devuelve el producto entre el porcentaje de la placa que no está a la sombra y el índice de radiación según el ángulo.

3. Manual de usuario

3.1. Instalación

El primer paso para utilizar la herramienta será instalar Unity. Para ello, es necesario instalar Unity Hub, aplicación que gestiona las diferentes versiones de Unity instaladas (a pesar de que solo necesitamos la más reciente).

Para instalar Unity Hub, basta simplemente con descargarlo de la página de descargas oficial de Unity (<https://unity3d.com/get-unity/download>), y completar la instalación como una aplicación cualquiera.

Una vez instalado Unity Hub, será necesario instalar alguna versión de Unity. La herramienta para la simulación de la irradiación solar no necesita ninguna versión en particular, y debería funcionar con cualquier versión de Unity, pero se recomienda instalar la más reciente de todas formas. Para comenzar la instalación, simplemente seleccionar `Installs`.^{en} el menú a la izquierda, pulsar en el botón `Install Editor`.^a la derecha, y elegir la versión deseada. No es necesario instalár ninguna de las opciones extras de compilación para otras plataformas.

Una vez instalado Unity, será necesario descargar el código fuente y resto de recursos desde Github. Para ello, descargar el código fuente del repositorio de GitHub, disponible en <https://github.com/Daniferrito/ShadowSimulator>. Para ello es recomendable clonar el repositorio entero, pero también se puede descargar el zip con el código desde “Code ZIP”. En caso de haber descargado el ZIP, será necesario descomprimirlo.

En este punto, simplemente será necesario abrir la herramienta con Unity. Para ello, simplemente seleccionar el botón “Open” desde Unity Hub, arriba a la derecha, y seleccionar la carpeta donde hayamos descargado la herramienta. Unity Hub automáticamente añadirá el proyecto a la lista de proyectos y lo abrirá.

En la ventana Hierarchy se mostrarán los principales objetos de la escena.



Figura 6: Vista del jerarquía de la escena en Unity

Main Camera controla el punto de vista de la escena. Aunque no es relevante en al cálculo de la simulación puede ser interesante modificarlo si queremos realizar animaciones. Además, en este objeto se ha incluido el algoritmo principal.

Directional Light permite definir el ángulo de incidencia del sol. En el algoritmo será controlado por medio del objeto sol.

Suelo (1) ha sido introducido para añadir una capa de opacidad en el horizonte, de esta forma cuando la altura sea inferior a 0 grados los rayos de sol quedarán en sombra.

Casas permite definir los edificios de la simulación. En el siguiente apartado se explica como pueden ser definidos.

Canvas comprende varios elementos utilizados en las animaciones. Los tres textos mostraran el índice de incidencia solar según varios criterios.

3.2. Configuración del entorno y definición de edificios

Lo primero que vamos a realizar es la configuración de la latitud donde se encuentra la vivienda. Para ello pulsa en *Main Camara*. En la ventana Inspector se mostrará la sigue información.

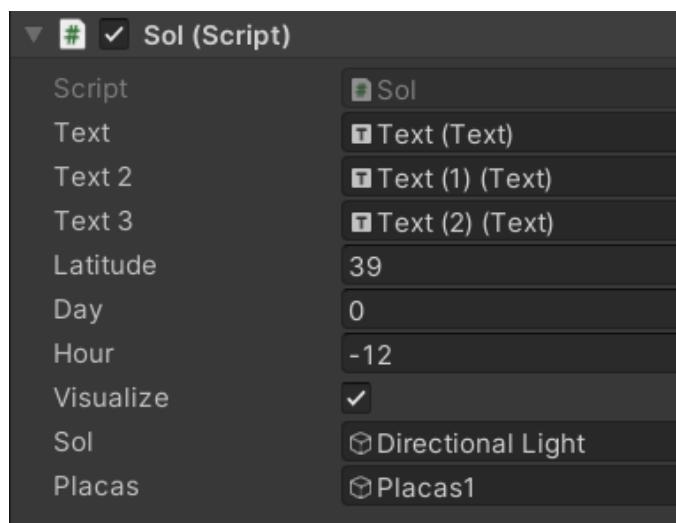


Figura 7: Vista del inspector en Unity

En la variable *Latitude* introduce el valor adecuado según donde se encuentre la casa.

Para definir los edificios selecciona uno de los objetos dentro de *Casas* y modifica sus características. Si quieres crear uno nuevo, pulsa el botón derecho en *Casas* y selecciona *3D Object / Cube* (también puedes usar otras formas geométricas como *Cilindro*, *Sfera*, ...) Aparecerá un nuevo objeto en la escena que podrás posicionar usando las herramientas de Unity. Observa como en la ventana *Inspector* aparecen los parámetros de la forma geométrica que podrás editar de forma sencilla. La escala utilizada corresponde a un metro por cada unidad de Unity.

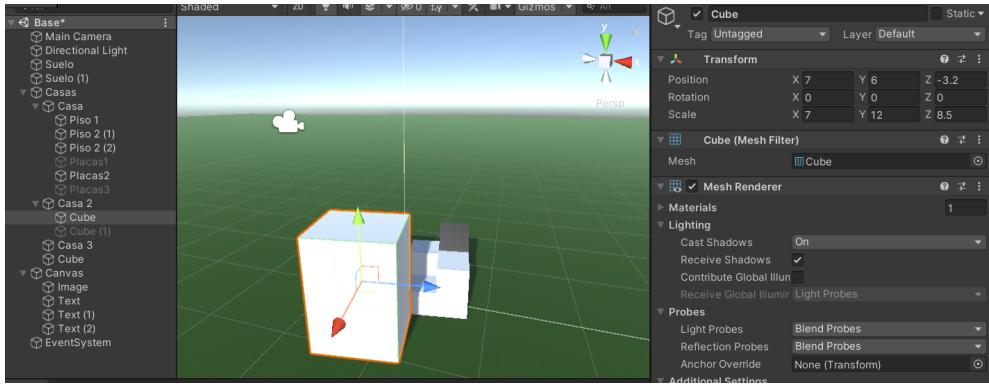


Figura 8: Vista del editor de Unity

Para modificar la posición de la placa solar selecciona el objeto *Placas2*. De igual forma como hemos hecho con los edificios, vas a poder modificar su posición dirección y tamaño.

Se han añadido dos placas más por si se quiere evaluar varias alternativas. Para modificar la placa activa has de abrir primero Main Camera y a continuación arrastra la placa a activar desde la ventana *Hierarchy* a la ventana *Inspector* en la variable *Placas*.

3.3. Ejecución y extracción de resultados

Para iniciar la simulación pulsa el botón *Play* que aparece en la parte superior en el centro. Se visualizará una animación con los rayos del sol incidiendo en la placa para el primer día del año. Esta simulación continuará hasta simular un año entero.

Los tres valores que se visualizan corresponden de arriba abajo:

- Índice de radiación solar según el ángulo de incidencia del sol con la placa
- Ratio de la superficie de la placa que está en sombra
- Producto de los dos valores anteriores

Si solo se requieren los resultados numéricos, desmarca el checkbox *Visualize* que aparece en la ventana *Inspector* de *Main Camera*.

Una vez terminada la simulación podrás descargar los datos seleccionando la carpeta *Assets*, en la esquina inferior derecha, seleccionando el fichero *results.txt*. En formato de este fichero ha sido explicado en la sección anterior.

También hemos creado tres vídeos con la simulación obtenida para tres días diferentes, en invierno, primavera y verano, que pueden ser consultados en las referencias.

Referencias

- [1] Página de descarga de Unity
<https://unity3d.com/get-unity/download>
- [2] Repositorio del proyecto en Github
<https://github.com/Daniferrito/ShadowSimulator>
- [3] Vídeo de la simulación de un dia en invierno
<https://youtu.be/7P1Zoyu35eI>
- [4] Vídeo de la simulación de un dia en primavera
<https://youtu.be/7u0e-SMTZAQ>
- [5] Vídeo de la simulación de un dia en verano
<https://youtu.be/WchT1ISMiAY>