



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Organización Industrial**

**Análisis mediante dinámica de sistemas  
del suministro de energía eléctrica en la  
UE con energía fotovoltaica**

**Autor:**

**Verdugo Nieto, Elisa Teresa**

**Tutor:**

**Miguel González, Luis Javier  
Ingeniería de Sistemas y  
Automática**

**Valladolid, Julio 2017.**



## Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar el suministro de la energía eléctrica, a partir de la tecnología solar fotovoltaica en la Unión Europea. Para ello se ha utilizado la metodología de la Dinámica de Sistemas y el software de Vensim. A través de ellos, se ha construido un modelo dinámico capaz de replicar la realidad y de simular posibles escenarios futuros. Los resultados obtenidos son positivos y coinciden con los objetivos planteados, ofreciendo distintas alternativas para la consecución de los mismos. Es importante tener en cuenta que se deberán realizar análisis más detallados o considerando otros métodos para una mayor comprensión del comportamiento del sector fotovoltaico.

**Palabras clave:** energía solar fotovoltaica, paneles solares, dinámica de sistemas, rentabilidad, producción energética.

## Abstract

The aim of this bachelor thesis is to analyse the supply of electrical energy, from the solar photovoltaic technology of the European Union. The methodology used for this objective is the System Dynamics, and the used software is Vensim. With them, it has been built a dynamic model capable of replicating the reality and to simulate future possible scenarios. The obtained results are positive and match with the raised objectives, offering different alternatives to reach them. It is important to consider that it would be necessary to do more detailed analysis or considering other methodologies for a better understanding of the behaviour of the photovoltaic sector.

**Keywords:** solar photovoltaic energy, solar panels, system dynamics, profitability, energetic production.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>7</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	7
1.2 FINALIDAD DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO .....	11
1.3 MOTIVACIÓN .....	12
<b>2. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA</b> .....	<b>13</b>
2.1 DEFINICIÓN.....	13
2.2 FUNCIONAMIENTO .....	13
2.2.1 Proceso de obtención de energía solar fotovoltaica .....	13
2.2.2 Factores que afectan a la energía solar fotovoltaica.....	14
<b>3. DINÁMICA DE SISTEMAS</b> .....	<b>17</b>
<b>4. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN.</b> .....	<b>19</b>
4.1 EL PROBLEMA .....	19
4.2 LA HIPÓTESIS .....	20
4.2.1 Premisas .....	20
4.2.2 Limitaciones .....	20
4.3 DIAGRAMA DE SISTEMAS .....	21
<b>5. PROGRAMACIÓN</b> .....	<b>23</b>
5.1 MODELO BASADO EN DATOS HISTÓRICOS.....	23
5.1.1 Base del modelo inicial.....	23
5.1.2 Costes que intervienen en el modelo .....	25
5.1.3 La producción de energía.....	27
5.1.4 La rentabilidad del sistema.....	31
5.1.5 La demanda de energía .....	32
5.2 MODELOS DE FUTURO PARA LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	33
5.2.1 Estrategia A .....	35
5.2.2 Estrategia B .....	36
5.2.2.1 Crecimiento siguiendo el BAU .....	36
5.2.2.2 Estancamiento de las instalaciones de paneles .....	37
5.2.2.3 Crecimiento optimista.....	38
5.2.2.4 Diferentes visiones de las estrategias tomadas.....	39
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>41</b>
6.1 RESULTADOS DE LA ESTRATEGIA A.....	41
6.2 RESULTADOS DE LA ESTRATEGIA B .....	44
6.2.1 Escenario 1: BAU .....	44
6.2.2 Escenario 2: estancamiento en las instalaciones.....	45
6.2.3 Escenario 3: doble crecimiento frente al BAU .....	47
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>51</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>57</b>
ANEXO A.1: EL MODELO DINÁMICO CON DATOS HISTÓRICOS .....	57
ANEXO A.2: LAS ECUACIONES .....	58
ANEXO B.1: EL MODELO DINÁMICO CON ESTRATEGIA A.....	65
ANEXO B.2: LAS ECUACIONES .....	66
ANEXO C.1: EL MODELO DINÁMICO CON ESTRATEGIA B .....	75
ANEXO C.2: LAS ECUACIONES .....	76
ANEXO D: CAUSAL LOOP DIAGRAM .....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Estimaciones de la evolución de la población en diferentes continentes según las Naciones Unidas.....	7
<b>Figura 2:</b> Consumo de energía mundial clasificado por tipo de fuente de energía.....	8
<b>Figura 3:</b> Emisiones de dióxido de carbono, separadas por fuente en EEUU.....	9
<b>Figura 4:</b> La potencia energética anual de las energías renovables, comparada con la potencia restante estimada de los combustibles fósiles en el planeta.....	10
<b>Figura 5:</b> Marco sobre el clima y la energía para 2020-2030.....	11
<b>Figura 6:</b> Diagrama de célula fotovoltaica.....	14
<b>Figura 7:</b> Irradiación solar en Europa.....	16
<b>Figura 8:</b> Diagrama de inventario y flujos, SD. Límites del crecimiento poblacional.....	17
<b>Figura 9:</b> Estimación de las energías renovables frente al consumo total de energía..	19
<b>Figura 10:</b> Eficiencia y precio de las diferentes tecnologías para construir módulos PV.....	26
<b>Figura 11:</b> Estimación del promedio global de los costos instalados de los sistemas fotovoltaicos solares y residenciales y de la gama de medias de los países de 2009 a 2014. ....	26
<b>Figura 12:</b> Factor de capacidad según las distintas energías en EEUU.....	28
<b>Figura 13:</b> Consumo de electricidad según datos históricos.....	34
<b>Figura 14:</b> Paneles instalados anualmente y su línea de tendencia.....	37

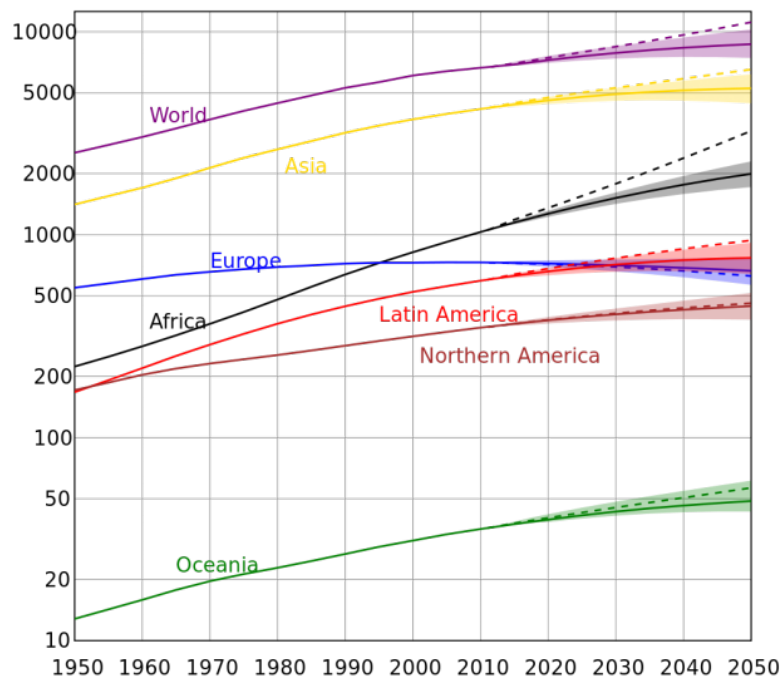
Se incluyen todas las figuras a excepción de las que corresponden a capturas de pantalla. Las capturas de pantalla de los modelos, se ven reflejadas en los modelos completos adjuntos en los anexos.

Las figuras correspondientes a gráficas del modelo, se expresan en los Anexos como ecuaciones.

# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

El mundo conocido hasta ahora ha ido experimentando continuos cambios relacionados con el crecimiento exponencial de la población mundial, como se puede apreciar en la figura 1. Este crecimiento se ha incrementado seriamente en los últimos años, gracias a las mejoras en los sistemas sanitarios en los países desarrollados y en vías de desarrollo, lo cual nos indica la latente necesidad de abastecer a la población mundial con recursos como los alimentos, el agua, la electricidad y muchas otras necesidades básicas. Pero, para conseguir estos objetivos, el futuro desarrollo de la población y las políticas a tener en cuenta deberán tener en cuenta muchos factores como se verá más adelante.

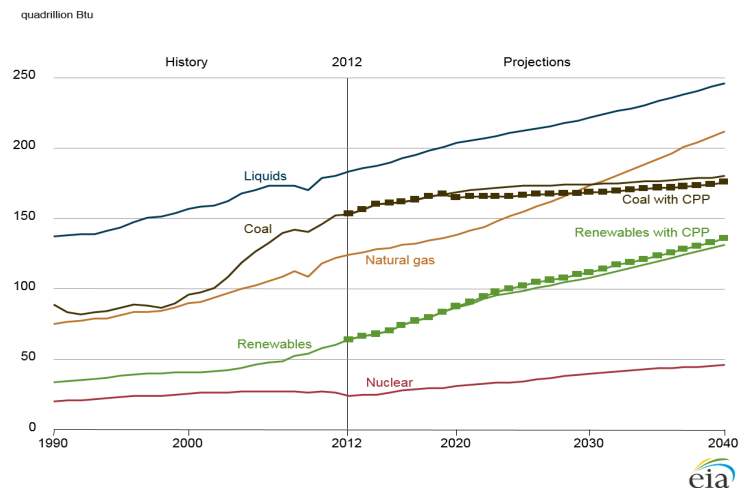


**Figura 1:** Estimaciones de la evolución de la población en diferentes continentes según las Naciones Unidas.

Fuente: Wikipedia, The Free Encyclopedia. [1]

El desarrollo y evolución de nuestro planeta está íntimamente ligado al mantenimiento del equilibrio de la calidad de vida de la población, lo cual recae sobre la capacidad de abastecer los recursos necesarios en el momento adecuado a los países que los necesitan. La importancia de las energías como fuente fundamental de los recursos para la evolución de las principales economías, industrias y otros ejes fundamentales del desarrollo mundial, será la base de este trabajo de fin de grado. Además, se tiene en cuenta que tanto la cantidad, como la disponibilidad y producción de dichas

energías es y será el punto de partida en la toma de decisiones de cada país. En la siguiente figura se muestra como el crecimiento de la población y el desarrollo de una vida más relacionada con la tecnología provocan un incremento en la demanda de energías a lo largo del tiempo.



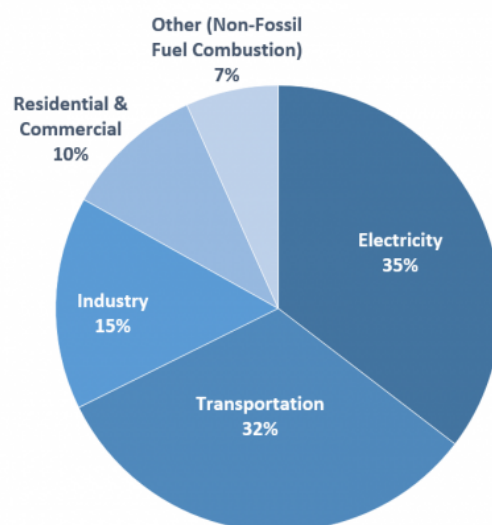
**Figura 2:** Consumo de energía mundial clasificado por tipo de fuente de energía. Fuente: EIA, Energy International Agency. [2]

Hasta ahora, las principales fuentes de energía, que han sido las determinantes del desarrollo mundial, son los combustibles fósiles, tales como el petróleo, el carbón, el gas natural, etc. A pesar de que estas energías son sencillas y cómodas de conseguir, tienen un límite a largo plazo. El masivo consumo de combustibles fósiles por las economías e industrias mundiales aumenta cada día, tal y como se ha indicado en el párrafo anterior. El crecimiento exponencial de la población no parece vaya a reducir la demanda de estas energías en los próximos años.

Además de ser limitadas, las fuentes de energía que provienen de combustibles fósiles presentan otros problemas como es la contaminación. El impacto medioambiental que provocan está ligado a la combustión necesaria durante el proceso de producción de la mayoría de ellas. Como se puede observar en la figura 3.

Debido a las limitaciones de estas fuentes de energía, tan populares hasta ahora, algunos gobiernos y asociaciones no gubernamentales han trabajado duro buscando diferentes alternativas para el futuro, tratando de evitar una futura crisis energética. [3]

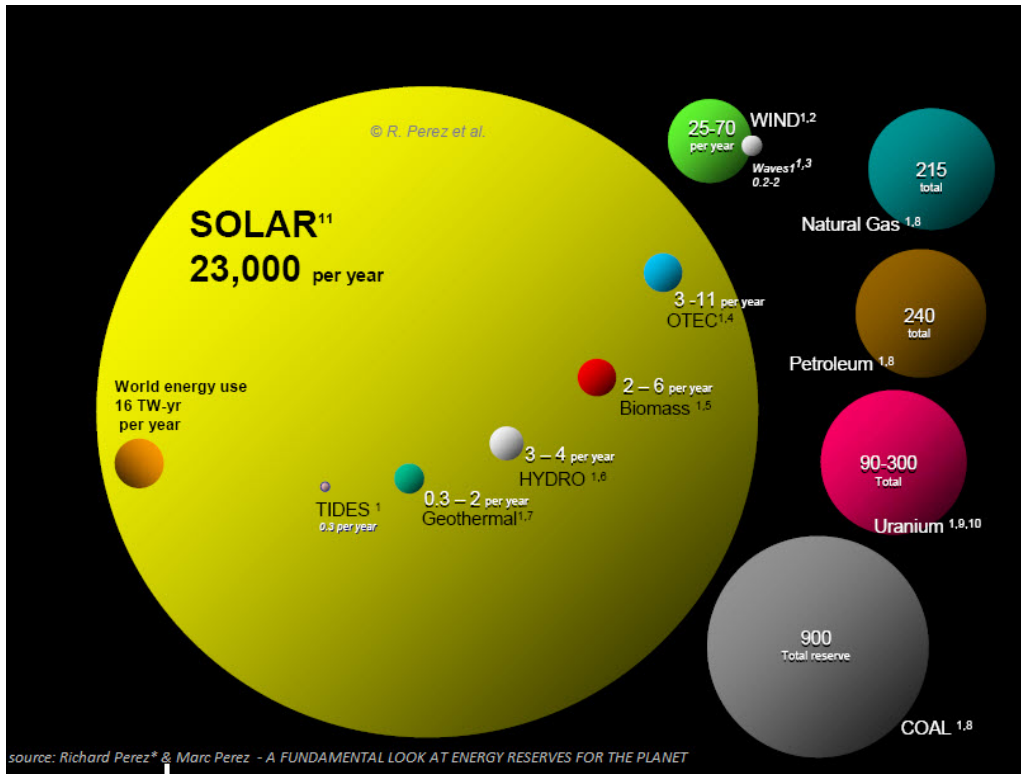




**Figura 3:** Emisiones de dióxido de carbono, separadas por fuente en EEUU  
Fuente: *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2015*. [4]

Tras años de investigación y fomento de nuevas tecnologías que sean capaces de sustituir los combustibles fósiles, parece que la mejor alternativa será el uso de energías renovables, conocidas por ser inagotables a escala humana y limpias en cuanto a generación de contaminación. La gran potencia que pueden generar las energías renovables es más grande que la capacidad actual de los combustibles fósiles, hasta ahora tan comúnmente usados. Pero, también poseen ciertas limitaciones, como puede ser la producción de las mismas, ya que en casos como la energía solar en sus comienzos los materiales necesarios para construir las instalaciones no han sido muy asequibles.

Existe una gran variedad de energías renovables, y cada una de ellas requiere de distinta forma de obtenerlas y, por lo tanto, provienen de distinta fuente de recursos. Las más conocidas son: energía solar, eólica, hidroeléctrica, biomasa, hidrógeno, geotérmica... No obstante, hay una fuente de energía que se diferencia del resto por ser la más potente hasta el momento entre todas, incluyendo los combustibles fósiles, y esa es la energía solar. En la figura 4 se puede observar esas diferencias de potencia:



Comparing finite and renewable planetary energy reserves (Terawatt-years).  
Total recoverable reserves are shown for the finite resources.

**Figura 4:** La potencia energética anual de las energías renovables, comparada con la potencia restante estimada de los combustibles fósiles en el planeta.

Fuente: Renewable Energy Power, 2012. DINO GREEN. [5]

La Comisión Europea planteó algunas estrategias y objetivos en 2014 debido a la necesidad del desarrollo e impulso de las nuevas energías limpias, y con la intención de también reducir el inminente cambio climático. En la figura 5, a continuación de este párrafo, se muestran los objetivos planteados por la Comisión Europea, el problema es que a día de hoy en 2017 no se han cumplido. Para mostrarlo mejor nos centramos en un único objetivo, por ejemplo, conseguir un 20% de consumo de energías renovables a nivel europeo, refiriéndose a que la producción de estas energías debería ser igual o mayor a este porcentaje para poder conseguir ese objetivo. Pero el problema es si ahora comparamos este 20% con el porcentaje actual de la Unión Europea, que se encuentra en torno al 12%, comprendemos que es tarea imposible conseguir ese 8% restante en 3 años que quedan para 2020. Por este ejemplo entre otros, observamos que han de tomarse decisiones y cambiar el modelo de actuación, que se está siguiendo, si lo que queremos es conseguir los objetivos planteados.

## 2030 Framework for Climate and Energy

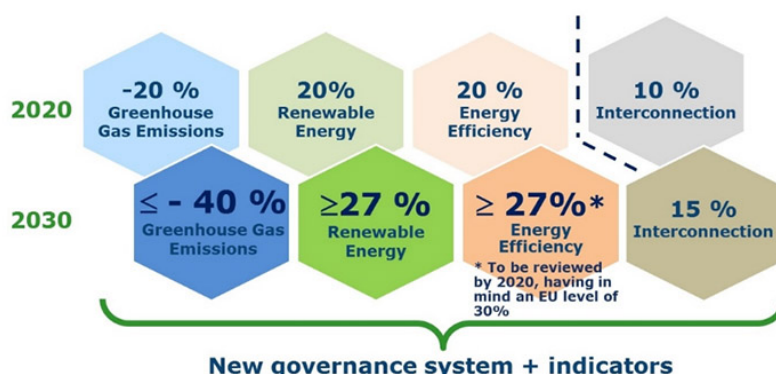


Figura 5: Marco sobre el clima y la energía para 2020-2030.

Fuente: European Commission, EU Action. 2014 [6]

### 1.2 Finalidad del trabajo de fin de grado

El propósito principal de este trabajo de fin de grado es el estudio del desarrollo futuro de la energía solar fotovoltaica en la Unión Europea, y analizar la capacidad de la energía fotovoltaica de abastecer la demanda de energía en Europa.

El análisis del futuro, con vistas a los próximos 40 años, se estudiará basándose en los datos históricos de energías en la Unión Europea. Por otra parte, dicho análisis buscará encontrar los principales factores que afectan a la energía solar fotovoltaica, de forma que se preste especial atención a los mismos y así se desarrollen políticas en el futuro para la obtención de mejoras en la producción.

Para comenzar, se ha llevado a cabo una investigación sobre los datos históricos encontrados en las bases de datos de energías de Europa y en las bases de datos disponibles en la Universidad de Valladolid. Se han subrayado variables como la producción de energía, el consumo de energía, la irradiación solar, el coste de producción y la esperanza de vida de los paneles solares fotovoltaicos, entre otros. Las bases de datos utilizadas se consideran fiables y con información suficiente sobre energía en el mundo, y fundamentalmente en Europa.

El análisis de los datos históricos y su comportamiento se ha realizado mediante la Dinámica de Sistemas. Con la dinámica de sistemas se puede crear un modelo informático capaz de reproducir el comportamiento de las variables que mayor influencia ejercen sobre la energía solar fotovoltaica. El modelo, además, representará los datos históricos, permitiendo una comprensión en profundidad del comportamiento de los datos y sus causas.

### 1.3 Motivación

La motivación que me ha llevado a escribir este TFG sobre energía solar fotovoltaica tiene tanto interés personal como profesional.

La motivación personal se debe a mi interés en la capacidad futura de evolución de las energías renovables y su crecimiento, y a su desarrollo como alternativa a los combustibles fósiles, junto con el positivo efecto medio ambiental que pueden producir. Además, con el tiempo la importancia de encontrar nuevas soluciones a la creciente demanda de energías por parte de la población, y la investigación en torno a una de las más importantes alternativas, me proporcionan una vía hacia la comprensión del problema que supone la demanda de energías en el mundo hoy en día.

En cuanto a la motivación profesional, tiene tanto que ver con la personal explicada antes, como además me permite expandir mis conocimientos y me abre puertas hacia un futuro desarrollo profesional en torno a la investigación y trabajo sobre las energías renovables.

Por último, he de añadir que la mitad del trabajo ha sido realizado desde Noruega, con recursos de la Universidad de Bergen. He participado en el programa Erasmus+, y he realizado las asignaturas: *Fundamentals of Dynamic Social Systems*, *Model-based Analysis and Policy Design*, y *System Dynamics Modelling Process*. Con ellas he comprendido la metodología de la Dinámica de Sistemas y aprendido ciertos conceptos y variables, que he respetado en este trabajo, con el idioma inglés.

## 2. Energía solar fotovoltaica

### 2.1 Definición

La energía solar se clasifica dentro de las energías renovables o energías limpias. En este grupo se pueden encontrar muy diferentes energías como son la geotérmica, hidroeléctrica, eólica... y la importancia de estas reside en su carácter ilimitado a largo plazo, como recurso natural. Pero, en el caso particular de la energía solar se presentan dos diferentes formas de producir energía: solar fotovoltaica, y solar térmica. La energía que estudiamos en este trabajo será la energía solar fotovoltaica, y consiste básicamente en la conversión directa de energía solar en electricidad.

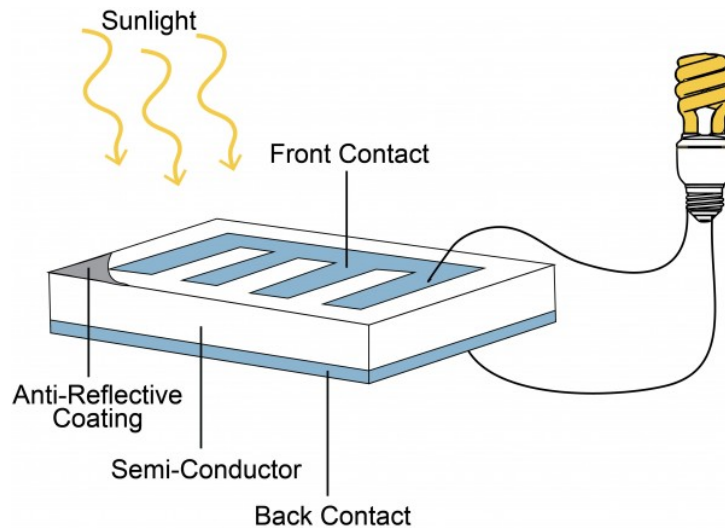
### 2.2 Funcionamiento

#### 2.2.1 Proceso de obtención de energía solar fotovoltaica

Para una definición adecuada del proceso de transformación de energía se tiene en cuenta el objeto fundamental de todo el sistema, los paneles solares. Los paneles están a su vez formados por células solares, que son los dispositivos semiconductores con la capacidad de convertir energía solar en electricidad. Los paneles solares más usados son aquellos cuya construcción se basa en silicio cristalino, ya que ocupan el 92% del mercado. La construcción de estos paneles solares tiene ciertas ventajas como energía, debido a la capacidad de producir sus componentes con economías de escala, abaratando el coste, y a su vez se trata de una tecnología claramente modular, permitiendo un trabajo de producción más detallado en pequeñas cantidades al mismo tiempo. [7][8]

A través de los paneles solares es capturada la irradiación solar y así es transformada en electricidad de corriente continua, este proceso es conocido como efecto fotovoltaico.

En la siguiente figura se presenta un esquema del proceso de conversión a energía fotovoltaica:



**Figura 6:** Diagrama de célula fotovoltaica.

Fuente: Center for sustainable energies, University of Michigan. 2016 [9]

### 2.2.2 Factores que afectan a la energía solar fotovoltaica

La cantidad de variables que tienen efecto sobre la energía fotovoltaica es inmensa, varias de ellas, las que se han considerado más importantes, se explican a continuación, pero en el modelo programado solo se tendrán en cuenta algunas para no complicar en exceso el entendimiento del mismo.

El **almacenamiento** de la energía cada día es más importante, resulta un factor fundamental para el desarrollo futuro de la energía fotovoltaica. Hasta ahora, las baterías que se han usado para almacenar la energía se reducen a las baterías de litio, pero las investigaciones que más interesan ahora son hacia las llamadas *liquid flow batteries* que, a pesar de ser más pesadas y de mayor dimensión, tienen mayor capacidad de almacenamiento, lo cual hace que la energía sea más económica y más cómoda, es decir, se disponga de ella cuando se necesite, y cuando haya un exceso de producción esto se pueda almacenar. [10]

Hasta hace poco el **coste** de producción de energía solar ha resultado un factor limitante. Sin embargo, en los últimos años este mismo coste ha sufrido una rápida caída acercándose al coste de producción de energía mediante combustibles fósiles. Este avance supone un gran progreso para la energía fotovoltaica, debido a que en el momento en el que el coste se iguale al del resto de energías, la energía solar resultará más atractiva gracias a sus otras cualidades, como el carácter inagotable, limpio, potente...

La **demanda** de energía requerida por la población influye directamente la producción de energía, el crecimiento de la demanda provoca un incremento en la producción de energías, incluyendo aquellas que provienen de los combustibles fósiles.

La **eficiencia** de los paneles solares es una característica muy importante y de la cual depende la capacidad que el panel solar es capaz de transformar en electricidad. Hoy en día esta eficiencia se sitúa en torno al 20%, es decir, de por ejemplo 1000KWh/m<sup>2</sup>/año recibidos por el sol, el panel producirá 200KWh. Este valor ha crecido en los últimos 10 años cerca de un 5% y se entiende seguirá creciendo en los próximos años.

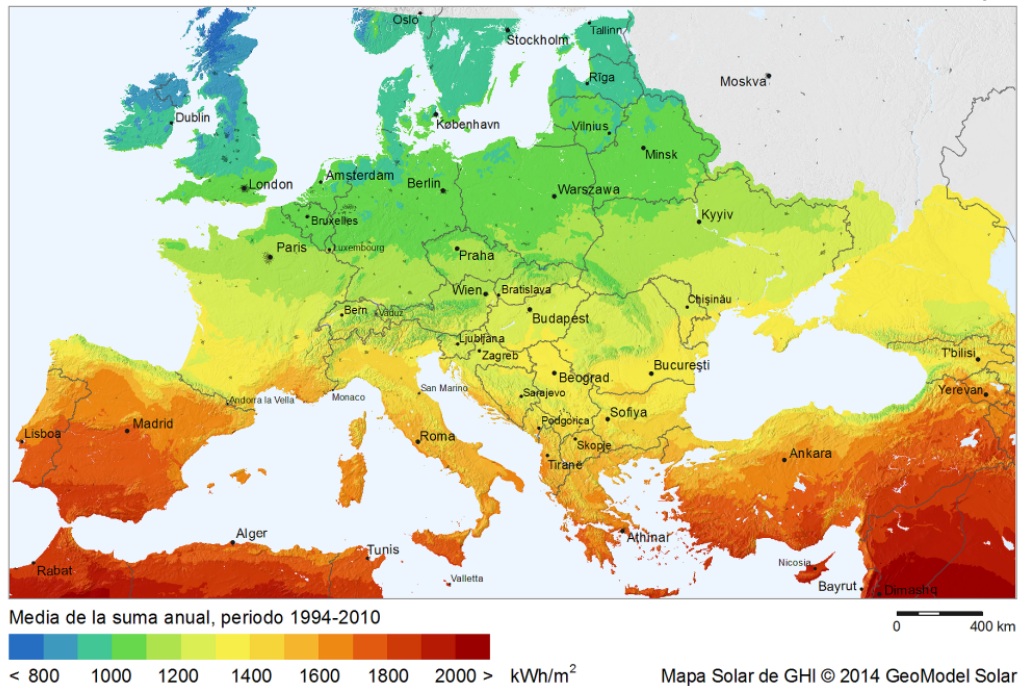
La **instalación anual de paneles** proporciona la capacidad instalada acumulada en Europa, y cada año varía. En el modelo desarrollado se verán los datos con más claridad para entender su comportamiento, pero en resumen esta instalación de paneles ha aumentado año tras año, a pesar de haber perdido cierta fuerza en los últimos 4-5 años, lo cual podría deberse a la reducción de inversores en las energías renovables.

Algunos componentes como los **inversores solares** no son tan conocidos por la población, pero resultan esenciales para cualquier sistema de energía solar fotovoltaica. Son los encargados de transformar la corriente continua en corriente alterna, la cual es usada con carácter comercial y doméstico, es decir, además de uso industrial, con estos componentes la energía fotovoltaica también se puede utilizar de estas otras dos formas. [11]

La potencia solar como ya se ha visto en la introducción es inmensa, y el factor que la relaciona directamente con la producción de energía solar es la **irradiación solar**. Algunos expertos llegan a afirmar que la Tierra recibe en 14,5 segundos la cantidad de energía necesaria para abastecer a la humanidad durante un día completo, por eso hemos visto antes es tan importante la mejora en la eficiencia de los paneles solares. A pesar de recibir una irradiación tan potente, esta varía mucho en función de la región de Europa en la que nos encontremos, y las diferencias ya en el mundo son abismales. En la figura 7, se puede observar como varía la irradiación solar en los distintos países de Europa.

## Irradiación Global Horizontal

## Europa



**Figura 7:** Irradiación solar en Europa.

Fuente: Solargis. 2011. [12]

La economía tiene por supuesto un papel importante en la producción de energía, en este caso el **precio de venta** será el factor del que dependerá principalmente la producción de energía solar. El precio de venta de la electricidad producida por energía solar fotovoltaica debe ser competitivo comparado con el precio normal de la electricidad.

La eficiencia de los paneles depende directamente de la fracción de la irradiación solar que el panel es capaz de convertir en electricidad. Una de las alternativas más comunes es el uso de **seguidores solares**, quienes permiten una mayor captura de irradiación sin modificar los paneles actuales. Se caracterizan por seguir al sol orientando los paneles hacia mejores ángulos para así recibir una mayor irradiación. Aun así, tienen algunas desventajas, ya que el mantenimiento y el envejecimiento de los paneles será más frecuente y más rápido, respectivamente.

Por último, otro factor que será determinante será la **superficie ocupada** por los paneles solares. En territorio europeo existen algunas restricciones sobre la dimensión total de suelo ocupada para fines de producción de energía, al igual que estas mismas restricciones existen sobre productos alimenticios, cultivo...

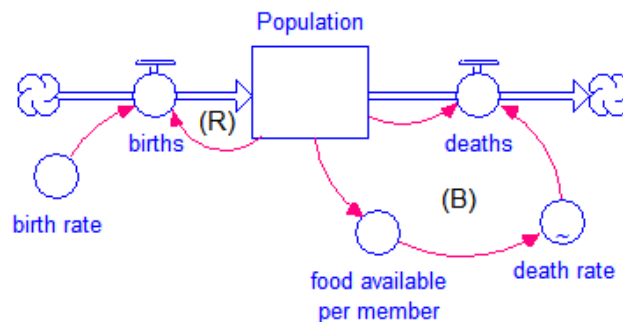


### 3. Dinámica de Sistemas

La metodología escogida para el análisis y estudio de este trabajo de fin de grado es la conocida como Dinámica de Sistemas (SD, System Dynamics). El principal objetivo de esta disciplina es hacer posible la comprensión de sistemas complejos a través de un modelo simulado y, además, la capacidad de analizar el comportamiento dinámico del sistema buscando solución a los problemas y ayudando en el proceso de toma de decisiones.

Moxnes (2009) afirma que: “La dinámica de sistemas complejos es un método para el estudio, diseño y control de sistemas realimentados. La principal motivación para el uso de la dinámica de sistemas es la tendencia a la mala administración y entendimiento de dichos sistemas.” [13]

Para construir un modelo de simulación como el mencionado antes es necesario el uso de conceptos como inventarios y flujos, estos conceptos suponen la base de la dinámica de sistemas. Mientras que la definición de inventario representa la acumulación dentro del sistema construido, y además caracteriza el estado del sistema, el flujo representa los cambios dentro del sistema a lo largo del tiempo, “moviendo” unidades entre los inventarios. En la figura 8, se puede observar un ejemplo de estas variables.



**Figura 8:** Diagrama de inventario y flujos, SD. Límites del crecimiento poblacional.

Fuente: Karim Chichakly, *isee blog*. [14]

Por otro lado, la dificultad es alta a la hora de construir un modelo capaz de replicar el comportamiento exacto de un sistema. Durante el proceso de construcción de un modelo se realizan bastantes aproximaciones para poder crear un modelo entendible. Debido a esta limitación, los recursos de información y bases de datos que se usen para construir el modelo deben ser totalmente veraces.

El software usado para la construcción del modelo de este TFG es Vensim® DSS para Macintosh Version 6.4E Double precision, desarrollado por Ventana Systems.



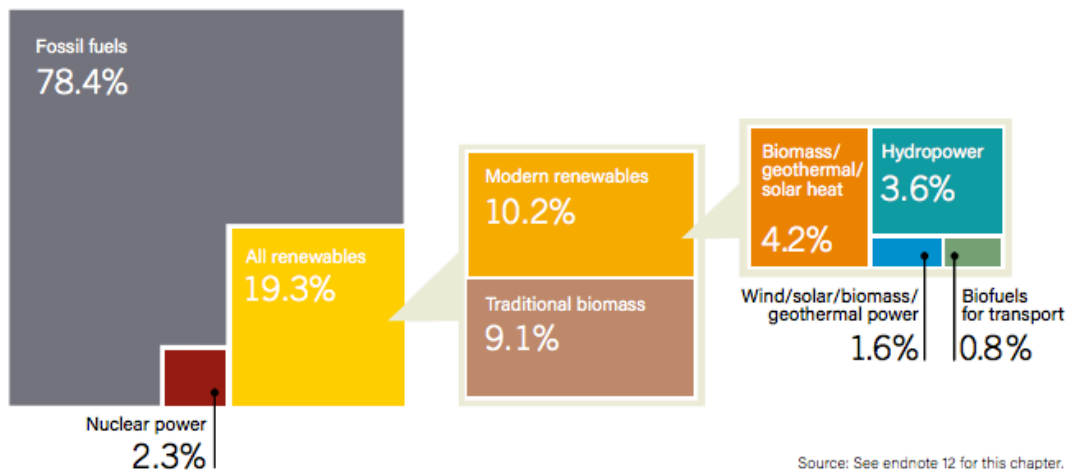
## 4. Planteamiento y justificación.

### 4.1 El problema

El aumento en el consumo de energías por parte de la población remarca la importancia de los recursos naturales necesarios para producirlas. Considerando el agotamiento de los recursos provenientes de los combustibles fósiles como un determinante del desarrollo global, este problema, si no se resuelve, puede llevar a una futura crisis energética para el mundo. Como ya se ha visto antes, la alternativa más atractiva a los combustibles fósiles es el fomento de las energías renovables.

La energía solar fotovoltaica supone una estrategia ganadora en cuanto a la sustitución de las energías provenientes de combustibles fósiles. Es más limpia en el ámbito medio ambiental, debido a que sus emisiones a la atmósfera estarían ligadas básicamente a su transporte. Así mismo, con visión de futuro no es una fuente inagotable, únicamente está limitada por las horas diurnas disponibles y las condiciones meteorológicas del entorno.

Sin embargo, en la actualidad la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica no es suficiente para cubrir la demanda total de energía. De hecho, el porcentaje que supone la energía fotovoltaica es ínfimo en comparación con las necesidades energéticas, y además se considera que en los próximos años esta demanda crecerá. Lo cual supone el principal problema de la energía fotovoltaica, como se puede observar en la figura 9.



**Figura 9:** Estimación de las energías renovables frente al consumo total de energía.

Fuente: REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century. [15]

## 4.2 La hipótesis

La hipótesis planteada para este trabajo de fin de grado, será que la base del crecimiento de la energía solar fotovoltaica residirá sobre las políticas llevadas a cabo para la instalación de nuevos sistemas fotovoltaicos, los cuales aumentan la capacidad fotovoltaica de la Unión Europea. En base a las distintas estrategias o tendencias tomadas para la futura instalación de nuevos sistemas fotovoltaicos se verán distintos resultados.

### 4.2.1 Premisas

Se considera como primera premisa que al igual que habrá un avance tecnológico también existirá un avance en cuanto al número de inversiones en energía fotovoltaica. La inversión económica en este sector es fundamental para poder aumentar la instalación anual de paneles, y a su vez, es importante para la mejora tecnológica hacia procesos de producción más económicos y eficientes.

La segunda premisa tomada será que todos los gobiernos en los países de la Unión Europea aceptarán las estrategias, y fomentarán el desarrollo de esta energía, para llevar a cabo una evolución conjunta hacia la sustitución de las energías provenientes de combustibles fósiles.

Otra premisa que se toma es que en el modelo no se considerará la posible contaminación de esta energía, ya que es muy pequeña en comparación con el  $CO_2$  que se evita produciendo la energía solar.

Por último, una premisa muy importante será la consideración general de la Unión Europea como un ente irrompible, es decir, la actuación y evolución de todos los países será en la misma medida. A pesar de que, como ha sido hasta la actualidad, cada país ha orientado sus políticas energéticas en función de sus recursos naturales propios. Pero, en este trabajo se considera esta premisa porque para que un desarrollo fuerte de la energía fotovoltaica en Europa se puede producir, será necesario el trabajo conjunto de todos los países en una misma dirección.

### 4.2.2 Limitaciones

Para la construcción de un modelo lo más semejante posible a la realidad, y capaz de reproducir el comportamiento de las variables implicadas se tomarán una serie de asunciones y limitaciones que caracterizarán el modelo.

Estas estarán explicadas con más detalle en el capítulo de programación, aun así, las más características se definen a continuación:

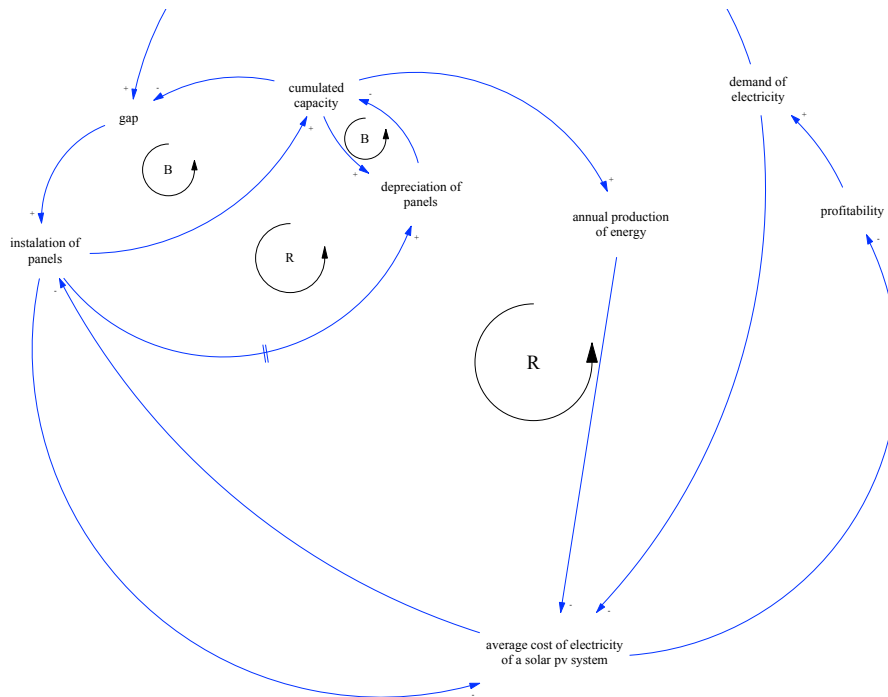
- Los paneles e instalaciones con las que trabajan los datos se asumen compuestas todas por paneles de silicio cristalino, de forma generalizada. Se simplifica así el coste a un coste ponderado entre los diferentes tipos de paneles, así como la eficiencia. [16]
- La actual vida media estimada de los paneles fotovoltaicos se estima entre unos veinte y treinta años, se asume así una vida media de las instalaciones de unos 25 años. No se considerará la posibilidad de que los paneles dejen de funcionar antes o después, ya que el modelo considera los costes de reparación y mantenimiento, entendiéndose así que los paneles que dejen de funcionar serán reemplazados al momento por paneles a pleno funcionamiento. [17]
- El consumo futuro de electricidad seguirá una tendencia constante basada en los datos históricos de consumo. Por lo tanto, se considera que el consumo seguirá creciendo de forma lineal en el tiempo.
- La premisa que engloba el desarrollo de Europa como un ente unido, también limita al modelo de forma que la irradiación solar reciba por Europa será una media relativa a la superficie disponible por cada país y a su irradiación.

### 4.3 Diagrama de sistemas

Para comprender el comportamiento de un sistema se necesita abarcar las variables que influyen al sistema, para ello se usan los diagramas de sistemas o diagrama de flujo. En este caso, se ha utilizado otro tipo de diagramas, los diagramas de influencia, conocido en el ámbito de la dinámica de sistemas como *Causal Loop Diagram (CLD)*.

Jay Wright Forrester, el pionero en la disciplina de la dinámica de sistemas desarrolló la herramienta de CLD para explicar los complejos modelos con *Stock and Flow Diagrams (SFD)*, como estructuras de realimentación entre las variables que caracterizan los modelos. [18]

A continuación, se muestra un *Causal Loop diagram* que explica las variables generales que influyen el modelo de este trabajo. Esta figura se encuentra en el Anexo D adjunto a la memoria.



Se trata de un diagrama muy sencillo que no tiene en cuenta todas las variables pero que da explicación a la posterior construcción del modelo completo simulado. En este diagrama se puede apreciar que el bucle principal es *reinforcing*, es decir, se realimenta positivamente. Este bucle principal engloba las variables de: instalación de capacidad energética, costes, rentabilidad, y demanda.

Las interacciones entre estas variables son distintas. El coste afecta negativamente a la rentabilidad, pero al instalar más potencia y generar economías de escala en la producción, se genera a su vez un coste menor, por lo tanto, otra relación inversamente proporcional. El resto de influencias de este gran bucle son directamente proporcionales, a mayor demanda mayor número de instalaciones serán necesarias, y cuanto más rentable mayor demanda de electricidad habrá, ya que será más barato.

Además, de ese gran bucle se puede observar tres más pequeños que son la base del posterior modelo *SFD*, las variables que afectan a la vida de las instalaciones fotovoltaicas. El bucle principal en este caso también es *reinforcing*, e implica las variables de instalación, depreciación, capacidad acumulada y brecha entre el objetivo y la realidad.

Por último, los pequeños bucles notados con B de *balancing loop*, representan relaciones inversamente proporcionales entre dos o tres variables: la instalación frente a la acumulación de capacidad, y la depreciación frente a la capacidad acumulada.

## 5. Programación

En la representación de la realidad sobre la energía fotovoltaica, se ha utilizado la dinámica de sistemas y dentro de esta para la construcción del modelo se ha basado en los *Stock and Flow Diagram (SFD)*. [19]

La estructura de los diagramas de inventario y flujo, se basan en una serie de elementos:

- Inventarios: esquematizados como rectángulos, representan la acumulación de contenido en el sistema.
- Flujos de entrada y salida: esquematizados con flechas, entran o salen de los inventarios transportando el contenido a otras variables.
- Válvulas: esquematizadas en el centro de los flujos con forma de X, que controlan los flujos de entrada y salida.
- Nubes: representan fuentes o depósitos para los flujos que no están reguladas dentro del sistema si no que resultan exógenos al mismo. [19]

Los modelos construidos con estas estructuras son capaces de replicar el comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo. A continuación, se describe la construcción y funcionamiento del modelo que representa al sistema de la energía solar fotovoltaica que se quiere analizar.

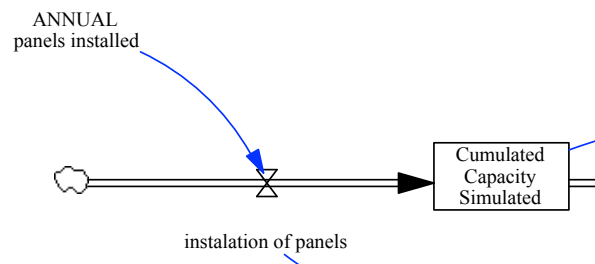
### 5.1 Modelo basado en datos históricos

#### 5.1.1 Base del modelo inicial

El modelo basado en datos históricos solo se simulará hasta el año 2014, el último año con datos completos disponibles. Una vez este modelo sea capaz de reproducir los datos y, por lo tanto, el comportamiento del sistema original, se continuará con el modelo que muestre las tendencias futuras del sistema a estudiar.

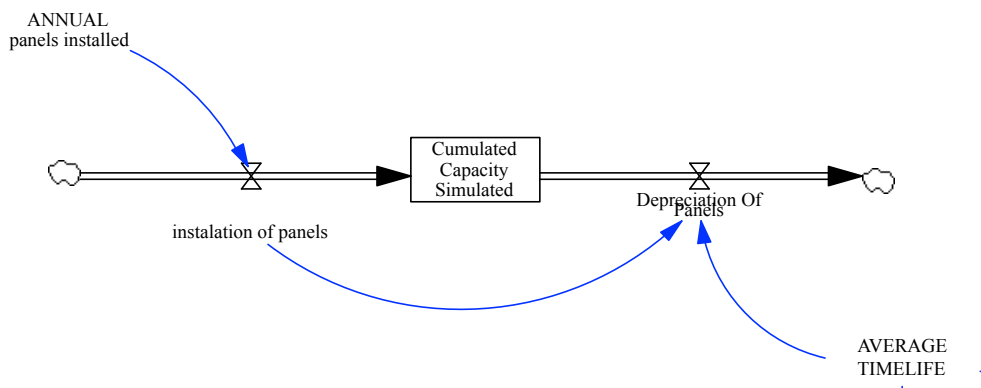
Para comenzar la construcción del modelo se empezará por la base del mismo, la vida de los paneles en el tiempo. Se crea un flujo que representa los paneles que se irán instalando año tras año en la Unión Europea, los datos de este flujo provienen de una variable exógena que se denominará *ANNUAL panels installed* que obtiene sus valores numéricos de la hoja de

Excel cargada en el modelo. Este flujo de paneles instalados acumulará su capacidad sobre el inventario denominado como *Cumulated capacity simulated*, el cual representa la capacidad acumulada de energía fotovoltaica, como se aprecia en la siguiente figura correspondiente al Anexo A.1. Los datos para la variable exógena se obtienen de la base de datos de la Comisión Europea y de Euroserv'er, de las *Energy Yearly Statistics* y de *Photovoltaic barometer*, respectivamente. Las unidades estaban en MWp, pero para el modelo la unidad escogida será KWp y KWh, dependiendo si es flujo o capacidad. [20]- [28]



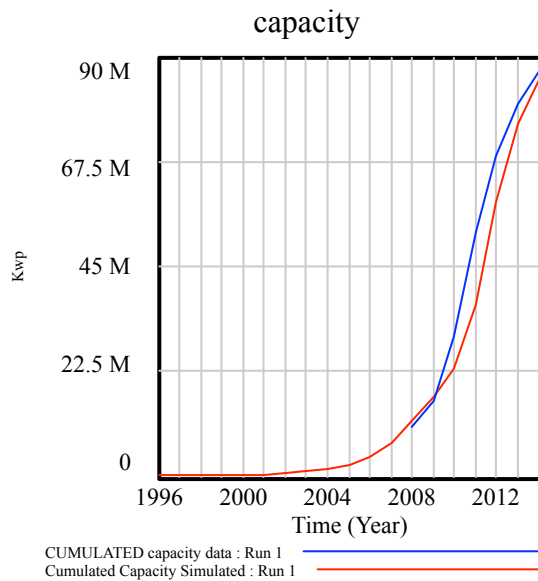
Como el sistema no es ideal los paneles se deterioran con el paso del tiempo. Se ha estimado 25 años como la vida media de los paneles, ya que los datos revelan ahora mismo entre 20 y 30 años de longevidad para los paneles. [17]

Estos 25 años actuarán como un *delay* fijo en el modelo, es decir, a los 25 años los paneles saldrán del inventario por el flujo de salida denominado *depreciation of Panels*, que como el nombre indica representa los paneles que se van desechando a lo largo del tiempo. Esta variable se puede observar en la siguiente figura correspondiente al Anexo A.1.



Para comprobar que este pequeño modelo representa la realidad, se crea una variable exógena al modelo que muestra los datos de capacidad acumulada real de la energía fotovoltaica, se denomina *CUMULATED capacity data*. Se simula el modelo y se compara los datos de capacidad acumulada con los valores obtenidos por la simulación.





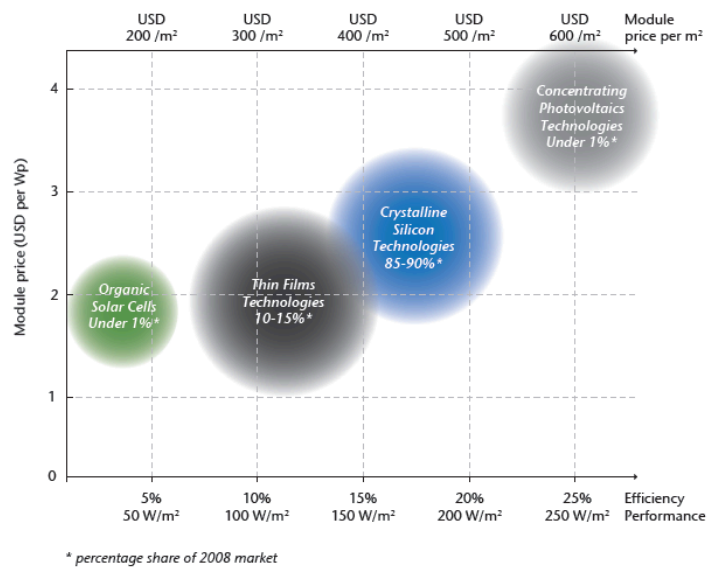
El gráfico mostrado representa la comparación que se buscaba y, como se puede apreciar, el modelo replica el comportamiento de forma bastante precisa, gráficamente. Y se ha tomado del Anexo A.2 adjunto a la memoria.

### 5.1.2 Costes que intervienen en el modelo

Para la evolución de la energía solar fotovoltaica el ámbito de los costes es primordial y, por ello, se tienen en cuenta en este modelo. Sobre todo, son importantes porque en este modelo se quiere observar la rentabilidad futura de esta energía comparada con el resto.

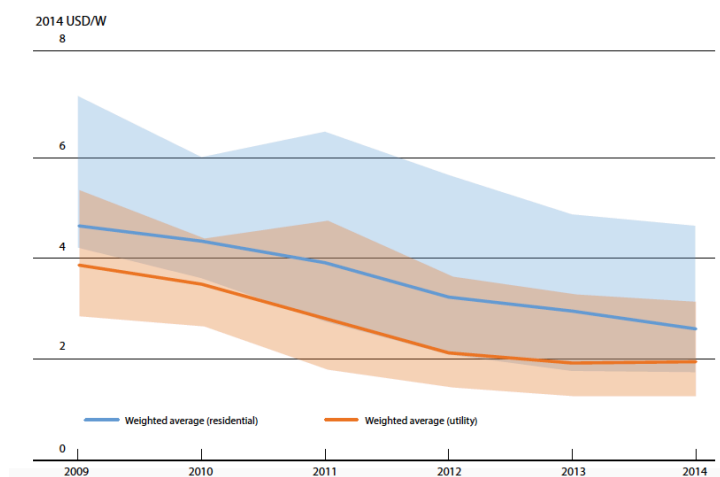
No obstante, no es tan importante la evolución de los costes en el tiempo, si no las diferencias existentes entre los distintos tipos de paneles, instalaciones y mantenimiento realizado sobre el sistema a estudiar. En primer lugar, en este modelo consideramos los módulos de Silicio cristalino (c-Si), porque representan el 85-90% del mercado global actual. Y, por lo tanto, los costes relacionados estarán basados en este tipo de módulos, como ya se mencionó en las limitaciones en el capítulo de planificación y justificación. [29]

En la imagen contigua está representado el precio, eficiencia y porcentaje en el mercado, de las diferentes tecnologías usadas como módulos para la construcción de sistemas fotovoltaicos. Y se muestra la razón por la que se ha escogido los módulos tipo c-Si para este trabajo.



**Figura 10:** Eficiencia y precio de las diferentes tecnologías para construir módulos PV.  
Fuente: International Energy Agency. [29]

En segundo lugar, cuando se habla en este trabajo de costes en un sistema de energía solar fotovoltaica, se hace referencia a dos tipos de costes: los costes relacionados con la instalación puntual del sistema, y a los costes referidos al mantenimiento y operación durante toda la vida del sistema. Se afirma que los costes asociados con mantenimiento y operación del sistema corresponden al 1% de los costes totales de instalación. Y los costes de instalar un sistema solar fotovoltaico de 1Kw de potencia han cambiado con el tiempo, reduciéndose en un 50% en los últimos 5 años, como se muestra en la siguiente figura. [29]



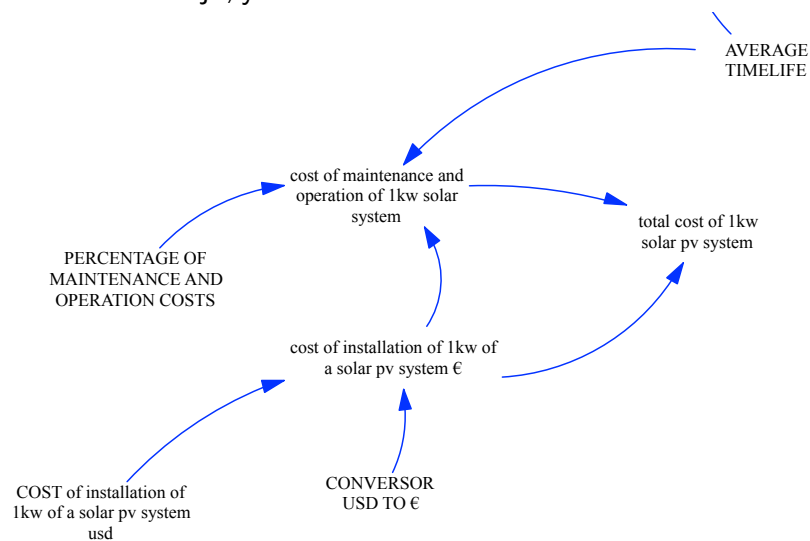
**Figura 11:** Estimación del promedio global de los costos instalados de los sistemas fotovoltaicos solares y residenciales y de la gama de medias de los países de 2009 a 2014.

Fuente: IRENA Renewable Cost Database and Photon Consulting, 2014. [16]

Los datos de costes de los que se dispone para el trabajo están representados en dólares estadounidenses por vatio (USD/W), por lo que se necesita un conversor a Euros que permita el uso de los datos en la hoja de Excel en el modelo, convirtiéndolos en €/KW. [30]

Una vez hallados los costes generales, se necesita calcular los costes relacionados con el mantenimiento y operación como ya se ha mencionado con anterioridad. Estos costes estarán basados además en la vida media estimada de los paneles. [31]

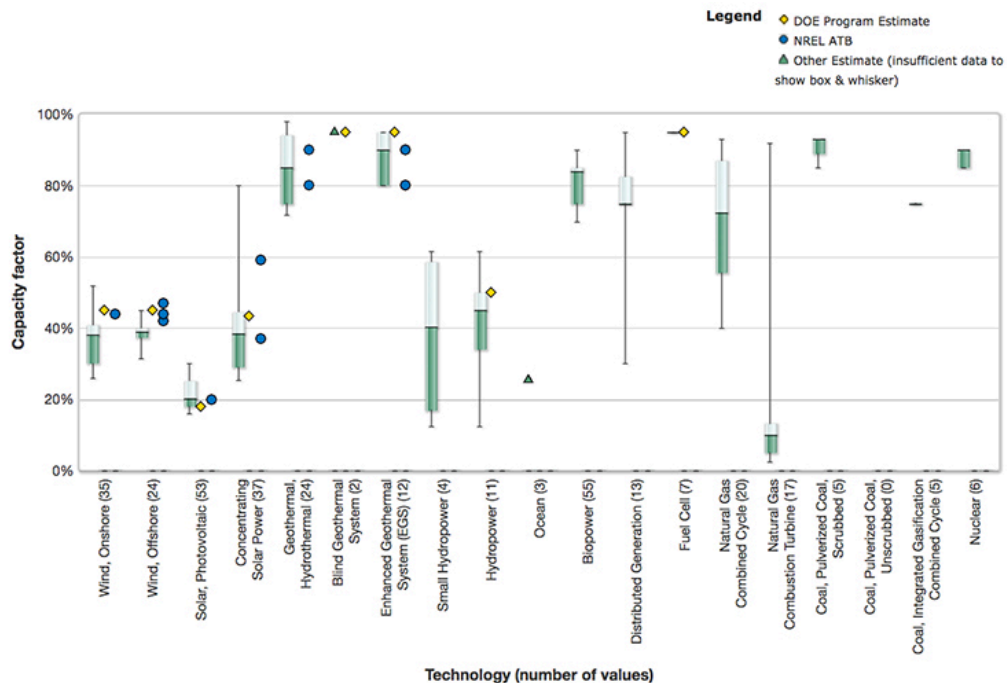
En la figura a continuación se muestra el resultado final de la parte de costes del modelo de este trabajo, y ha sido tomada del Anexo A.1.



### 5.1.3 La producción de energía

La producción energética se puede expresar de distintas formas, las más comunes son la representada por el *capacity factor*, y la referida a la irradiación recibida por el sol, junto con la eficiencia y funcionamiento de los paneles solares. Aunque en este trabajo se utilizará la segunda opción, es interesante conocer la alternativa del factor de capacidad, que representa la relación entre la capacidad total del sistema con la energía producida por el mismo. Una definición más adecuada sería la de: el factor de capacidad es la cantidad de potencia generada actual por una instalación comparada con su capacidad o potencia nominal. [32]

En la figura que sigue a continuación se observa el factor de capacidad medio de energía solar fotovoltaica, y este se encuentra en torno al 20%, el cual no es un valor grande. En los próximos años, la industria fotovoltaica debería mejorar este porcentaje.



**Figura 12:** Factor de capacidad según las distintas energías en EEUU.  
Fuente: NREL, National Renewable Energy Laboratory. [33]

De todas formas, en este trabajo de fin de grado se ha usado la otra alternativa para medir la energía producida. En este caso la producción de energía dependerá de cuatro factores de acuerdo con el modelo:

- Irradiación solar: la cantidad de sol recibida por los paneles solares se mide en KWh/m<sup>2</sup>/año, y se sitúa en torno a 1200KWh/m<sup>2</sup>/año de media en Europa. [34]
- Eficiencia o producción de los paneles solares: la capacidad de los paneles de transformar la irradiación recibida por el sol en electricidad. Para este modelo se establece un valor de 0.2, es decir, los paneles son capaces de transformar el 20% de la energía recibida. [35]
- Pérdidas de los paneles: además de la eficiencia, es importante considerar las posibles pérdidas que los paneles solares presentan. Para este modelo se consideran pérdidas debido a: el polvo acumulado sobre el cristal, los inversores usados, los cambios de corriente AC/DC, las sombras y, por último, las pérdidas asociadas a temperaturas. Por lo tanto, se ha establecido para este modelo unas pérdidas en torno al 20%. [36]

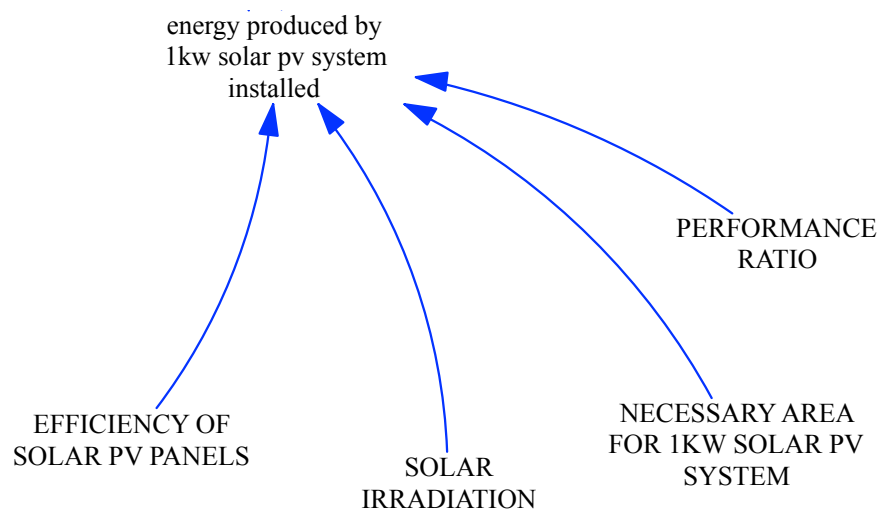
- Superficie necesaria: el área disponible para instalar los paneles solares es determinante, pues es fija en función de la potencia que se necesite. Se calcula, como punto de partida, el área necesaria para instalar un sistema solar fotovoltaico de 1KW de potencia nominal. El cálculo del área se basa en la ecuación 1.1: [37]

*Potencia nominal =*

$$\text{Área} * \text{Irradiación solar}(STC)^1 * \text{Eficiencia} \quad (1.1)$$

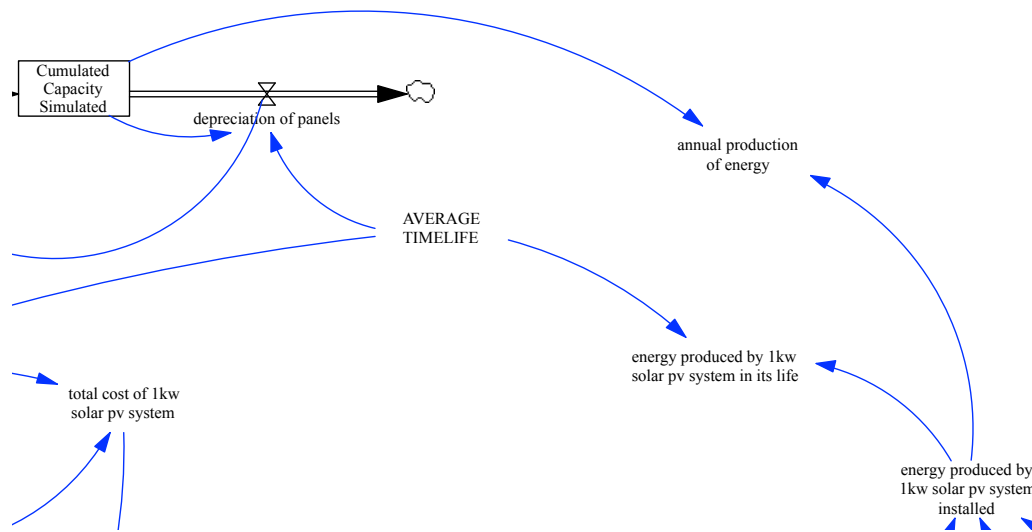
$$\rightarrow \text{Área} \cong 5,7m^2$$

Como resultado de la multiplicación de estos cuatro factores se obtiene la energía producida por un sistema solar fotovoltaico de 1KW de potencia nominal. A continuación, se muestra esquematizado en el modelo SFD del sector de producción energética del sistema, correspondiente al Anexo A.1.



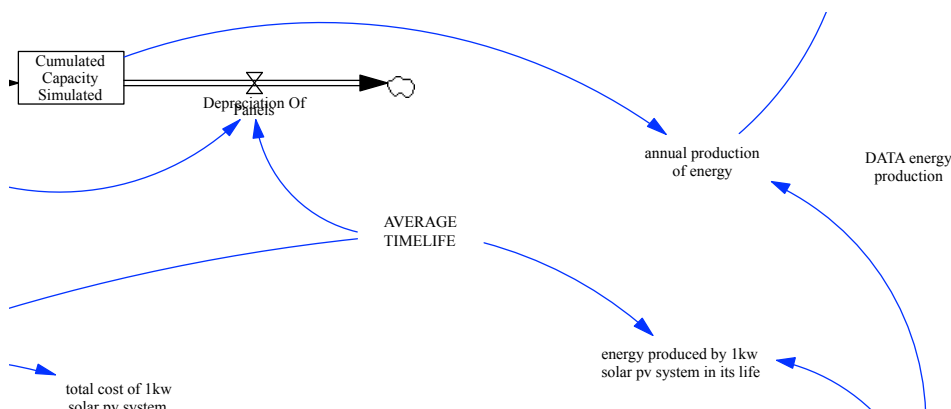
A partir de esa última variable, *energy produced by 1kw solar pv System installed*, se obtiene la energía capaz de producir un sistema solar de 1kw de potencia nominal. Pero la importancia de esta parte del modelo va más allá, el objetivo es analizar la cantidad de energía producida por la Unión Europea, por lo tanto, a partir de la última variable se continua el modelo *SFD* como en la siguiente imagen del Anexo A.1:

<sup>1</sup> STC, Standard Test Conditions.



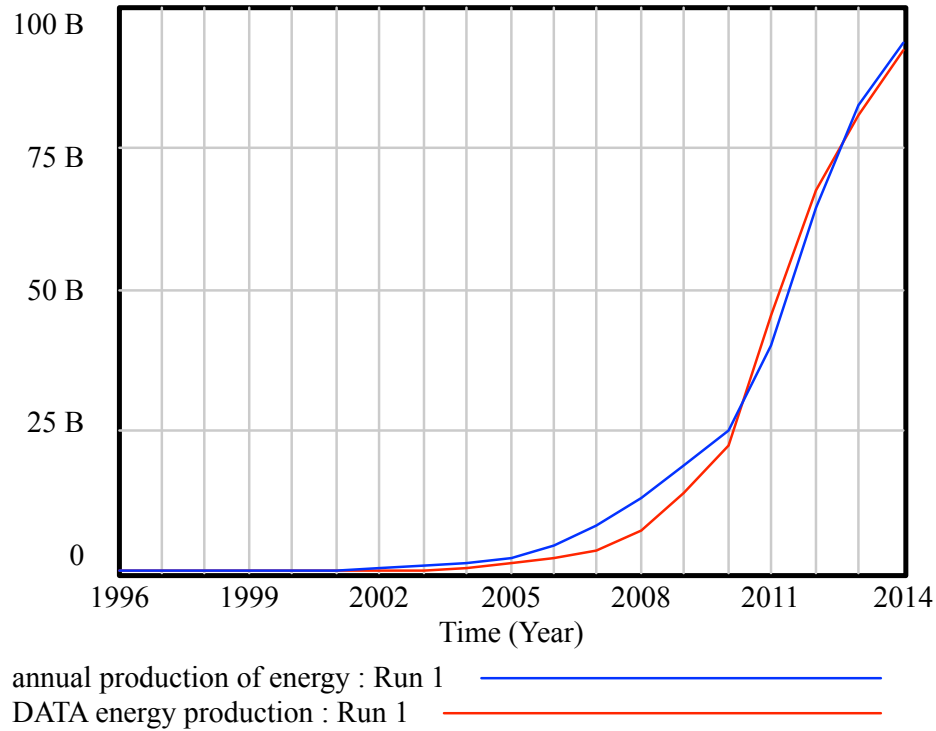
Obteniendo así la cantidad total de energía capaz de producir un sistema durante toda su vida. Más adelante se muestra la importancia de esta variable.

Para finalizar este sector del modelo completo, se debe comprobar la fiabilidad de la simulación en comparación con los datos históricos de energía producida. Se crea entonces una variable auxiliar que represente los datos de energía producida denominada *DATA energy production*, la cual extrae los valores de la hoja de Excel. Y a parte se genera otra variable como resultado de la simulación, denominada como *annual production of energy*, que combina la capacidad acumulada con la energía producida por cada kw instalado, como se muestra en la siguiente imagen del anexo A.1. [38]



Se simula el modelo y se compara las dos variables para comprobar la precisión del modelo construido, y se muestra la gráfica a continuación, correspondiente al Anexo A.2, en la que se puede apreciar la validez del modelo debido a su exactitud con los datos históricos.

## Production of Energy

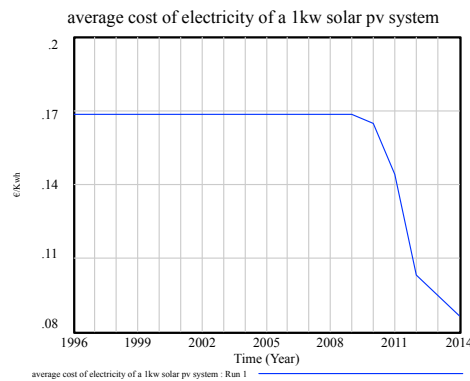


### 5.1.4 La rentabilidad del sistema

En el sector de la energía solar fotovoltaica es de gran importancia el atractivo económico, al igual que en cualquier otro sector dependiente de inversores. Por lo tanto, en este modelo se debe considerar la rentabilidad de producción de esta energía. Se diseña una nueva variable denominada como *average cost of electricity of a 1kw solar pv system*, la cual representará el atractivo económico de esta energía. Y en posibles vías futuras sería interesante conocerla para tomar decisiones de subvenciones, pero este tema no se tratará en el trabajo de fin de grado.

A continuación, se muestra tanto la ecuación que determina esa rentabilidad como la evolución de la rentabilidad con el tiempo. En la cual se observa como el coste se ha ido reduciendo en comparación a la energía producida, por tanto, un incremento en la rentabilidad de la energía fotovoltaica.

La gráfica y ecuación 1.2 se encuentran en el Anexo A.2.



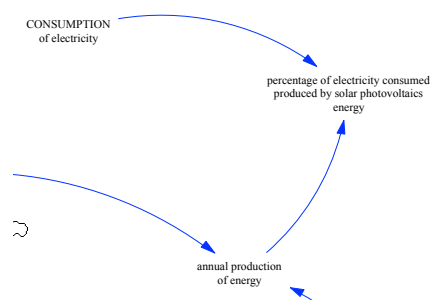
$$\text{average cost of electricity of a 1kw solar pv system} = \frac{\text{total cost of 1kw solar pv system}}{\text{energy produced by 1kw solar pv system in its life}} \quad (1.2)$$

### 5.1.5 La demanda de energía

La demanda energética genera oscilaciones en el sector energético, debido a su gran influencia sobre los precios de la energía. La importancia de abastecer esta demanda con la energía producida en el sector renovable, y en este caso el sector solar fotovoltaico, es inminente. Esto es debido a que la energía no abastecida por energía solar será proporcionada por otras fuentes que ahora mismo sean más potentes, como son las provenientes de combustibles fósiles.

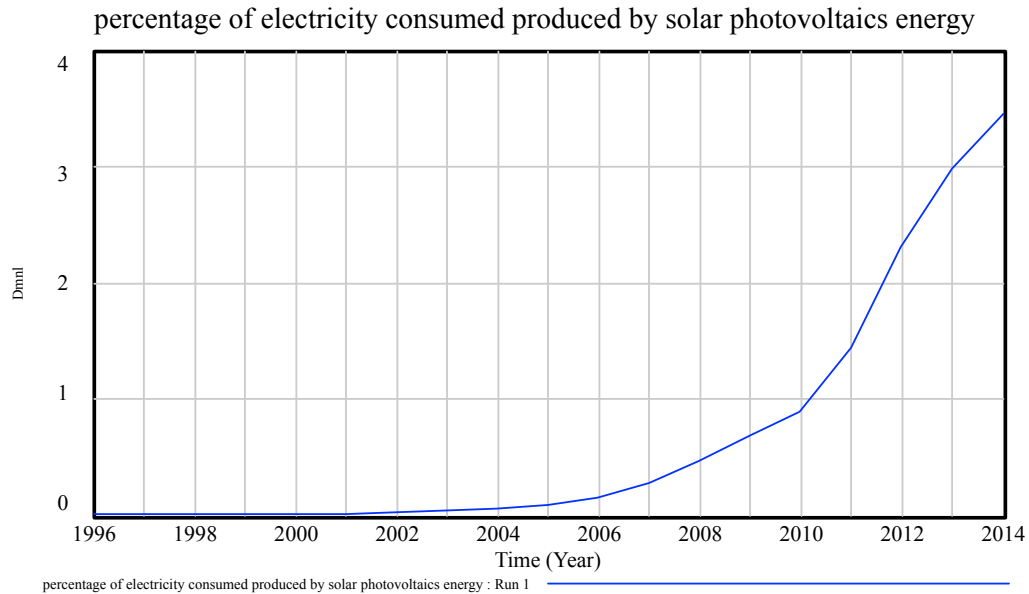
Para analizar la capacidad del sector solar fotovoltaico de suministrar suficiente energía se crean dos variables nuevas. La primera extrae los datos del Excel adjunto, y es denominada como *CONSUMPTION of electricity*, representando la demanda histórica energética hasta el momento. Y la segunda variable muestra el porcentaje de esa demanda que la energía solar fotovoltaica es capaz de abastecer, y se denomina como *percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics energy*. [39]

La imagen mostrada a continuación representa estas variables y se corresponde con el Anexo A.1.





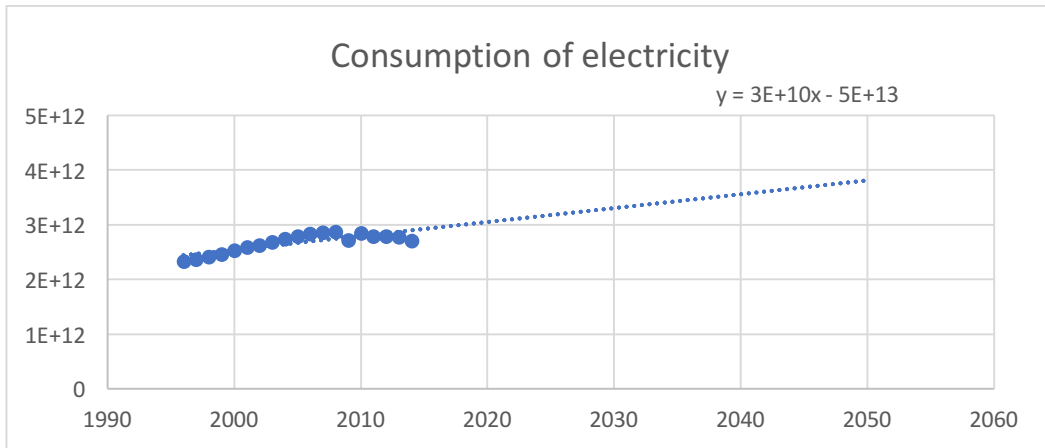
Para finalizar el último apartado de este modelo se muestra a continuación, en el gráfico del Anexo A.2, como el porcentaje de energía abastecida ha ido evolucionando con el tiempo y el crecimiento del sector fotovoltaico.



## 5.2 Modelos de futuro para la energía solar fotovoltaica

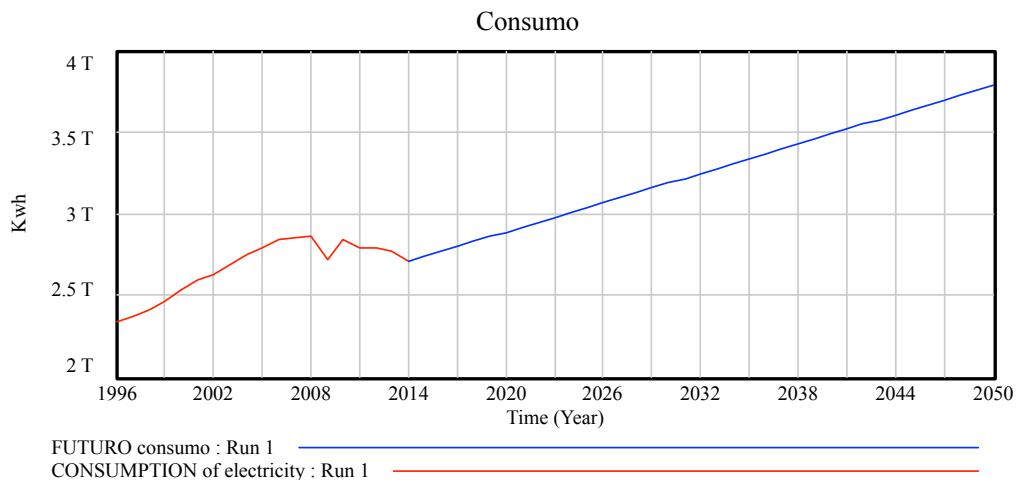
En el apartado anterior se ha descrito el funcionamiento del sistema solar fotovoltaico a partir de los datos históricos, y se ha demostrado la veracidad del modelo creado. En este apartado se tratan distintas estrategias o planes de acción para los futuros años hasta 2050, y aunque cada estrategia contempla un distinto método de actuación, hay variables del modelo que se han supuesto comunes en su desarrollo futuro.

El consumo futuro se considera que tendrá un crecimiento constante, y estará basado en la tendencia de crecimiento que ha existido hasta ahora en el sector energético. Esa suposición será válida para cualquiera de las estrategias tomadas. Los datos representados a continuación son los de la demanda energética en la Unión Europea desde 1994 hasta 2014. Y la línea de tendencia mostrada indica la pendiente del crecimiento de esta variable hasta ahora, esta pendiente caracterizará el crecimiento de la futura demanda dentro del modelo.



**Figura 13:** Consumo de electricidad según datos históricos.  
 Fuente: Creada exclusivamente para el TFG, por Elisa Teresa Verdugo Nieto.

Con esta línea de tendencia obtendremos el crecimiento que muestra el modelo a continuación. El cual será el mismo para todas las estrategias. Y cuyo gráfico a continuación se obtiene del Anexo A.2.



La otra variable común a las diferentes estrategias será el coste. Aunque el coste de instalación y por consiguiente el de mantenimiento han decrecido en los últimos años, se considera que a partir de ahora el coste será constante. Esto se debe a que el coste ahora mismo está establecido en torno a los 2000USD/KW, y aunque estudios afirman que el coste de instalación puede decrecer, se considera para este modelo que no decrece para que aquellas empresas interesadas en este sector mantengan cierta rentabilidad en la producción de estos sistemas.

### 5.2.1 Estrategia A

Esta primera estrategia se basa en la consecución del objetivo planteado por la *International Energy Agency*. Y busca conseguir 3000GW de potencia nominal instalada de energía solar fotovoltaica. Para conseguir este objetivo se calcula un crecimiento constante anual con una tendencia aproximándose a lo lineal. Estos valores serán una nueva variable para el modelo que se denominará objetivo. Para que la instalación de paneles persiga ese objetivo se crea una estructura de *goal seeking*, con la que se busca acortar la distancia entre la potencia instalada realmente y el objetivo a conseguir anual. [19]

Para llevar a cabo un modelo de *goal seeking*, que se puede traducir como persecución de objetivo, se necesitan una serie de variables:

- El objetivo a conseguir: ya explicado en el párrafo anterior, la variable que nos interesa busca aproximarse con la mayor precisión a este objetivo.
- GAP: brecha o distancia que existe entre el valor real y el que se quiere conseguir, para que un modelo persiga el comportamiento de *goal seeking* esta distancia deberá disminuir con el tiempo. Como en la siguiente ecuación:

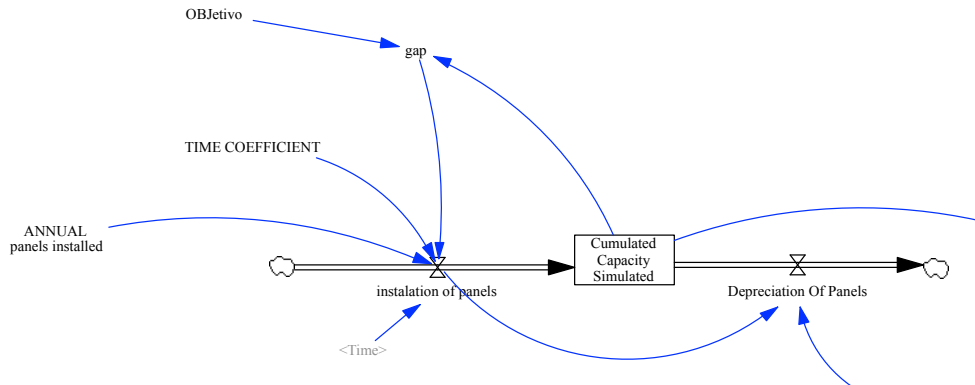
$$Gap = objetivo - cumulated\ capacity \quad (2.1)$$

- Variable que persigue al objetivo: en este caso será la capacidad instalada de potencia nominal, y sirve para comparar con el objetivo constantemente.
- Flujo de entrada a la variable a conseguir: en este caso son los paneles instalados cada año, los cuales dependerán de lo cerca o lejos que la variable del modelo esté del objetivo. Esta es su ecuación:

$$IF\ THEN\ ELSE\ (time < 2015, ANNUAL\ panels\ installed, \frac{gap}{TIME\ COEFFICIENT}) \quad (2.2)$$

- Coeficiente de tiempo: tiempo de medida de resultados, es decir, cada año en este caso se medirá como de cerca está el objetivo para recalcular el flujo de entrada.

La siguiente estructura, del Anexo B.1, muestra cómo queda en el modelo SFD esta estructura de *goal seeking*, la cual caracterizará la primera estrategia tomada para el modelo futuro.



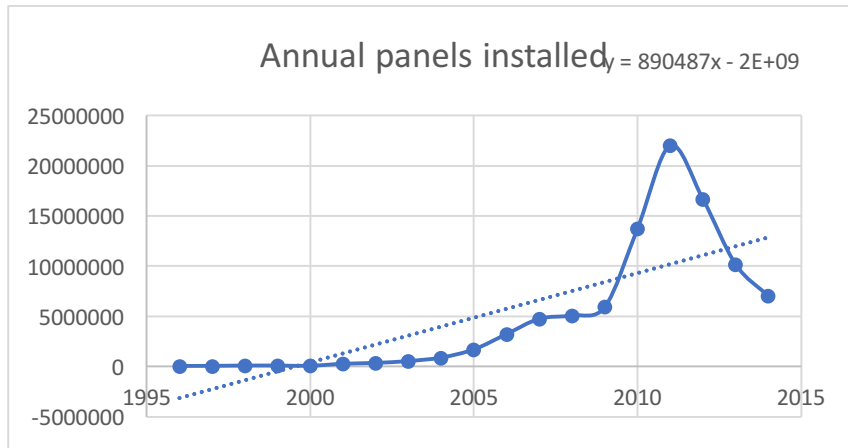
## 5.2.2 Estrategia B

Esta estrategia no busca conseguir un objetivo, si no, que lo que busca es un crecimiento constante en la instalación de paneles. Busca por lo tanto un crecimiento más fluido y menos abrupto debidos a la búsqueda de valores precisos como objetivo. Esta estrategia tendrá distintas líneas de tendencia, y, por lo tanto, se subdividirá en tres estrategias distintas en función de las suposiciones tomadas sean optimistas, realistas o pesimistas.

### 5.2.2.1 Crecimiento siguiendo el BAU

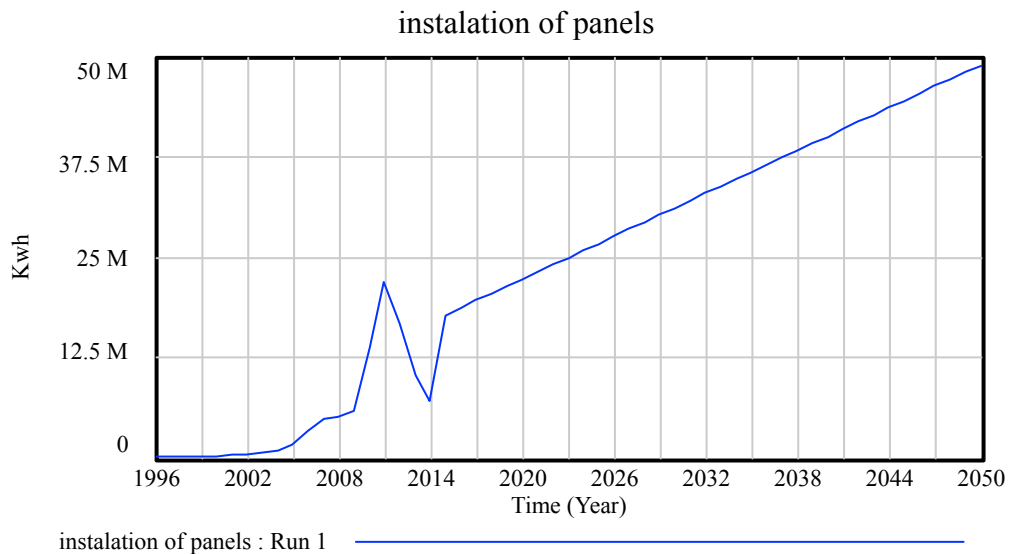
El BAU representa *Business As Usual*, es decir, que el crecimiento siga la línea de tendencia que ha seguido hasta ahora. Esta sub estrategia representaría una visión realista del futuro, ya que el crecimiento del sector sería en la misma proyección que hasta ahora.

Hasta el 2009 los datos han experimentado un crecimiento más o menos constante y lineal pero después sufren un cambio drástico, debido tanto al *boom* de la energía fotovoltaica como a la crisis financiera, y por tanto la pérdida de inversores. Aun así, se ha tratado de representar una línea de tendencia lineal que se aproxime a los datos como se muestra a continuación.



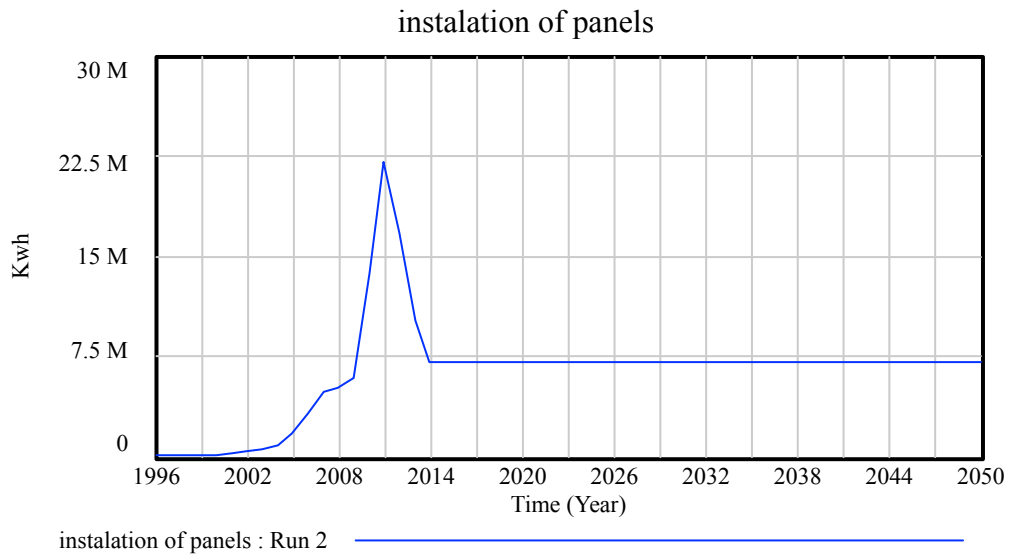
**Figura 14:** Paneles instalados anualmente y su línea de tendencia.  
 Fuente: Creada exclusivamente para el TFG, por Elisa Teresa Verdugo Nieto.

Esta línea de tendencia proporciona la pendiente que deben seguir los datos si la estrategia B se considera realista. Se calculan en Excel los datos futuros siguiendo dicha tendencia y se obtiene el gráfico a continuación al simularse en el modelo, correspondiente al Anexo C.1.



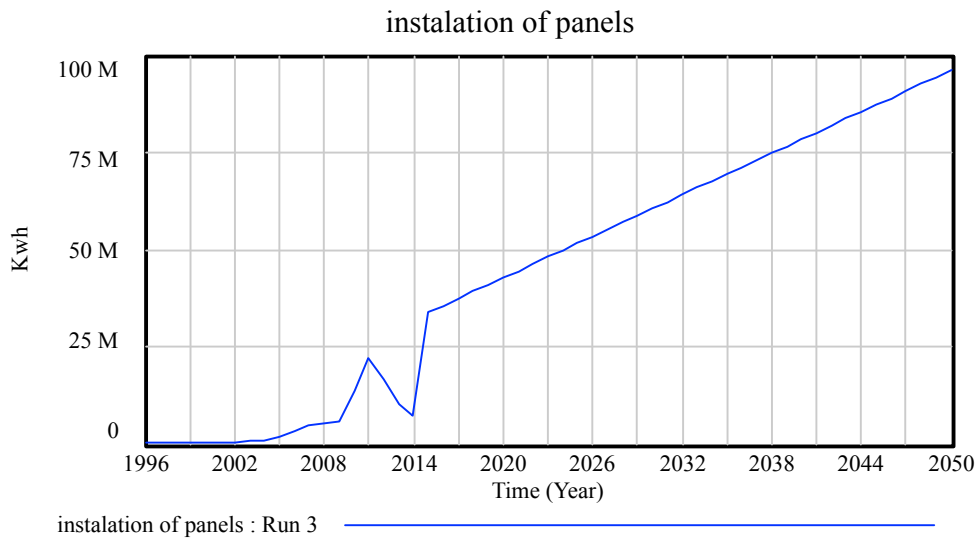
### 5.2.2.2 Estancamiento de las instalaciones de paneles

Esta sub estrategia muestra la visión más pesimista, que supone un estancamiento en el crecimiento de las instalaciones. Asume que hasta 2050 las instalaciones anuales de paneles serán constantes e iguales a las instaladas en el año 2014. Y entonces la variable de futuros paneles instalados sería una constante establecida en 7013600 KWh/año. La figura a continuación, del Anexo C.2, representa esta estrategia.

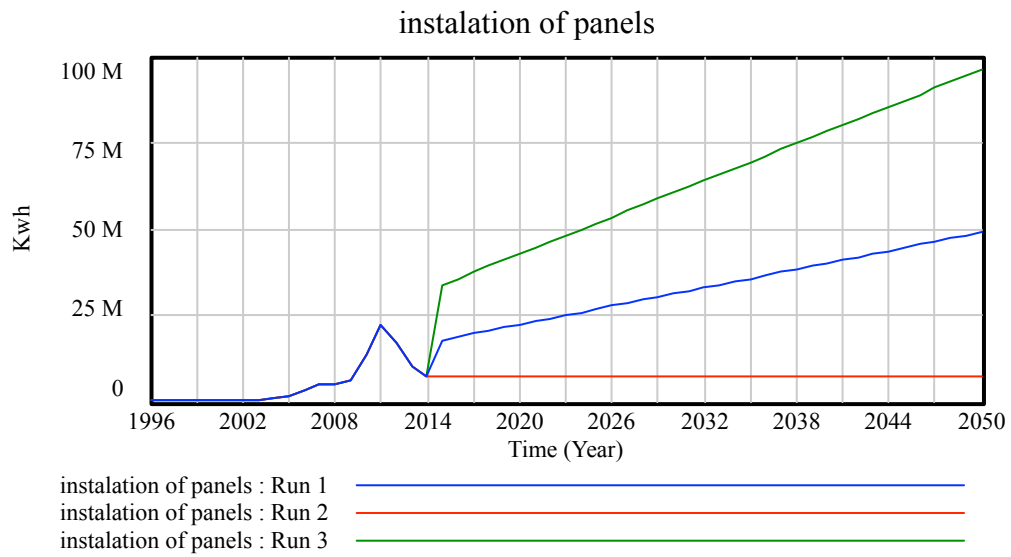


### 5.2.2.3 Crecimiento optimista

Esta sub estrategia plantea la posibilidad de un desarrollo económico tan fuerte, que las inversiones en energía solar fotovoltaica incrementen hasta el punto de que el crecimiento que experimente las instalaciones anuales de paneles sea el doble de la tendencia llevada hasta ahora. Esto supone el doble de pendiente que en la estrategia del *BAU*. Y a continuación se muestra la evolución del crecimiento de los paneles hasta ahora, del Anexo C.2.



#### 5.2.2.4 Diferentes visiones de las estrategias tomadas



En el gráfico mostrado, se ven las diferentes alternativas a seguir en el futuro. Y este gráfico se corresponde con el Anexo C.2.





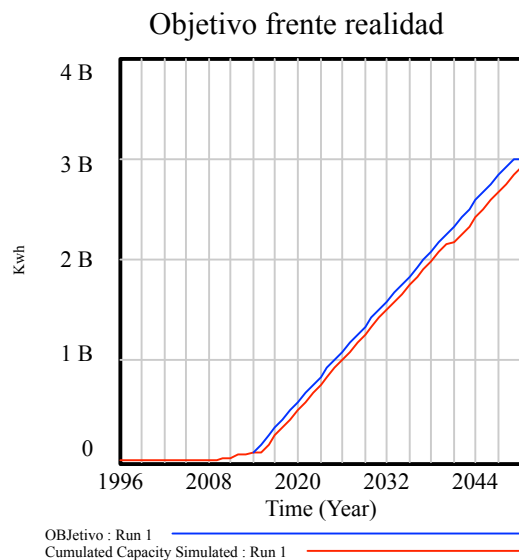
## 6. Resultados y discusión

Para el análisis de los resultados en este trabajo se ha tenido en cuenta la existencia de dos modelos dinámicos según la estrategia tomada para el desarrollo futuro de la energía fotovoltaica en Europa. Y como consecuencia los resultados de cada estrategia se analizarán separadamente.

### 6.1 Resultados de la estrategia A

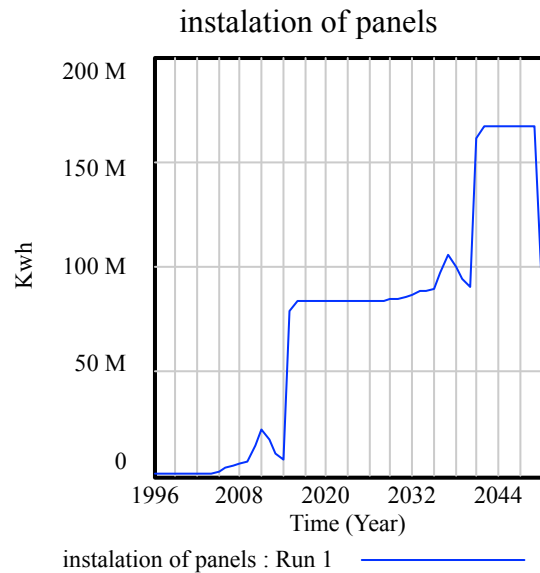
La estrategia A perseguía una estructura de *goal seeking* como se planteó en la programación. El objetivo de esta estrategia era alcanzar los 3000GW de potencia nominal instalada de energía solar fotovoltaica.

Como se aprecia a continuación, en la figura del Anexo B.2, el objetivo de capacidad acumulada se consigue según el modelo dinámico creado para el trabajo. Sigue además una estructura lineal y constante de crecimiento, que como se ve persigue al objetivo desde muy cerca. Según la simulación de este modelo, en el año 2050 la capacidad acumulada de energía fotovoltaica será aproximadamente de 2917GW de potencia, lo cual se aproxima mucho al objetivo inicial planteado.

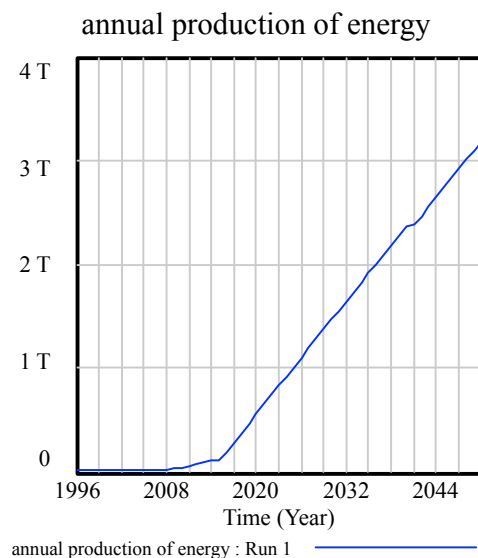


Con esta estrategia se ha comparado el objetivo anual de potencia nominal instalada con el valor real de la misma. Así es como la variable *GAP*, sufre constantes variaciones al igual que el flujo de instalación de paneles. Estos cambios sobre todo se deben a los reajustes en cuanto a la consecución del objetivo, y se observan períodos de tiempo en los que se mantiene constante el flujo de instalación durante años. En contraposición hay un incremento que instantáneo en torno a 2040 que duplica el flujo de instalación.

Pero a pesar de esta irregularidad el modelo presenta una caída en los últimos años de simulación representando la aproximación al objetivo final de 2050, y una posible estabilización del modelo en torno a ese flujo de instalación de paneles. La gráfica a continuación, del Anexo B.2, lo muestra:

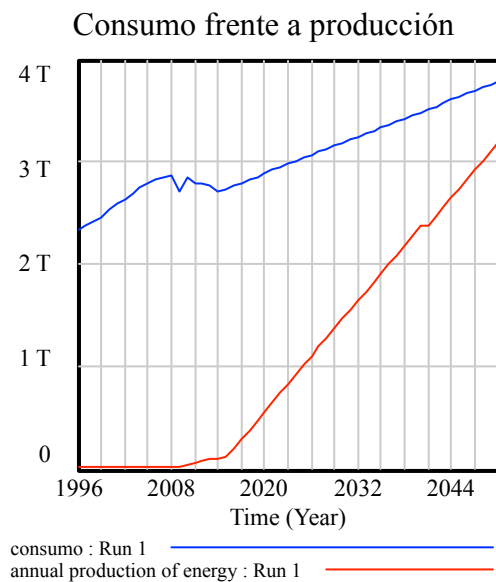


En cuanto a la producción energética del sector fotovoltaico, como se ve en la siguiente gráfica del Anexo B.2, también sufre una evolución lineal constante y de incremento siguiendo el comportamiento de la potencia acumulada, debido a que están íntimamente ligadas. La producción de energía solar fotovoltaica por parte de la Unión Europea en 2050 llegaría a 3.192 trillones de KWh, lo que supone una producción de energía fotovoltaica 34 veces mayor a la de 2014. Esta producción supondría una mejora remarcable para la sustitución de las energías provenientes de combustibles fósiles.

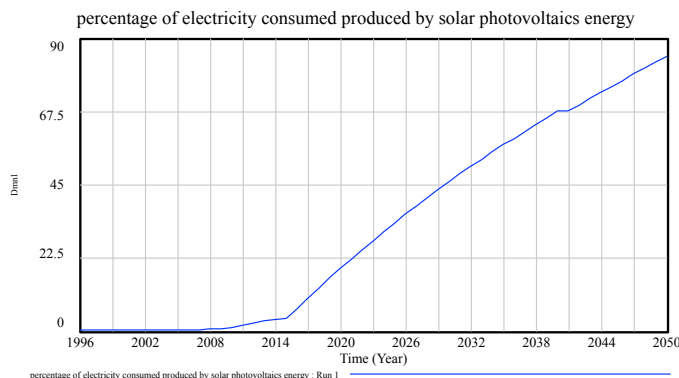


Por último, como resultado de estos progresos tanto en el flujo de instalación de sistemas fotovoltaicos como en la producción energética, la capacidad de la Unión Europea de abastecerse con energía solar fotovoltaica ha aumentado considerablemente según el modelo construido. El consumo ha seguido un crecimiento lineal y constante, al igual que la producción. La diferencia en este caso es que la producción ha crecido con mayor rapidez, debido a que el flujo de instalaciones ha incrementado mucho la capacidad de la UE para producir energía fotovoltaica.

Y, a continuación, se puede apreciar como la evolución de estas dos variables va aproximándose, indicando un abastecimiento mayor por parte de la energía solar fotovoltaica. Esta imagen corresponde al Anexo B.2.



Como consecuencia de esto el porcentaje capaz de abastecer la energía fotovoltaica incrementa casi exponencialmente, como se muestra en la figura siguiente del Anexo B.2. Acercándose a un 90% de suministro de electricidad gracias a las tecnologías fotovoltaicas.



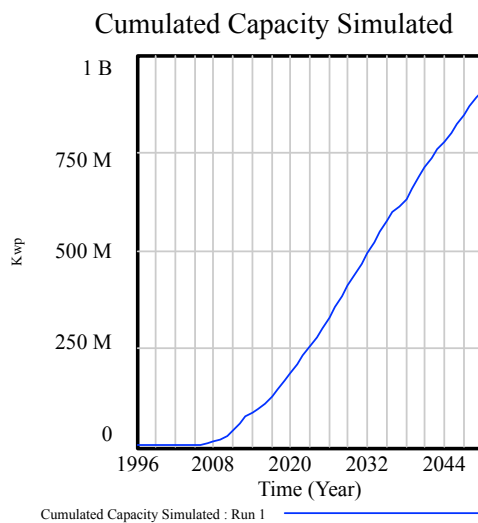
## 6.2 Resultados de la estrategia B

La estrategia B está fragmentada en tres sub estrategias, o también se pueden considerar como 3 escenarios distintos. Esta estrategia se basa fundamentalmente en un flujo de instalación de paneles constante o de al menos crecimiento constante, evitando así incrementos o caídas abruptas en la cantidad a instalar anual.

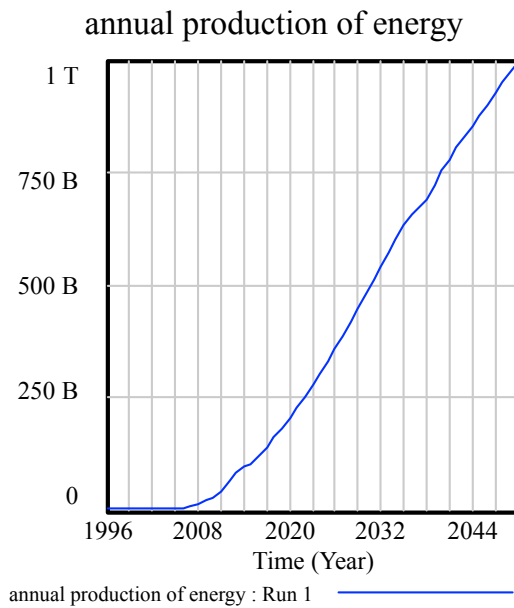
### 6.2.1 Escenario 1: BAU

Este escenario se considera como el más realista debido a que sigue el crecimiento que ha habido hasta ahora, con la misma pendiente. En el modelo se representa como *Run 1*.

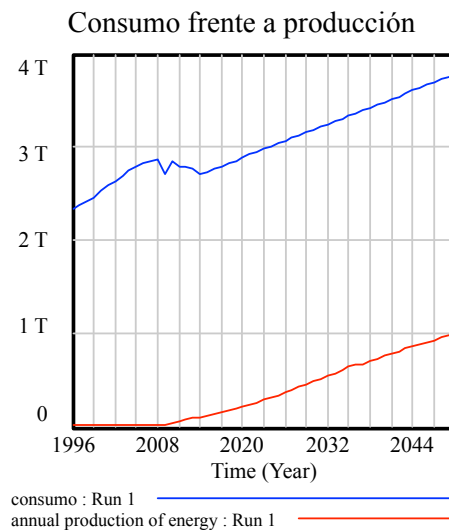
Como ya se vio en la programación del modelo la instalación de paneles es constante y por supuesto sigue la pendiente de los datos históricos, por lo tanto, la capacidad acumulada de energía solar fotovoltaica aumentará de forma lineal y constante llegando a 912.8 GWp, lo que supone una capacidad diez veces mayor a la de 2014.



Como consecuencia del aumento de la potencia nominal instalada de sistemas fotovoltaicos, se produce un aumento de similar pendiente en la producción de energía solar fotovoltaica. A continuación, se muestra ese aumento mediante una gráfica. Ambas gráficas se encuentran dentro del Anexo C.2, expresadas en términos de ecuaciones.



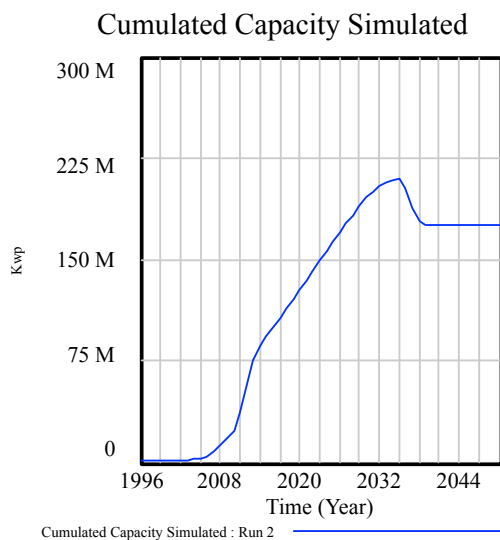
Por último, en este escenario se compara la simulación de la producción de energía fotovoltaica frente al consumo de la población en la Unión Europea. Que como se puede observar a continuación, en la imagen del Anexo C.2, ambos crecen de forma constante y con similar pendiente de acuerdo al *BAU, Business As Usual*. Además, en este escenario se consigue un abastecimiento del 26,4% del total de la electricidad consumida por la UE.



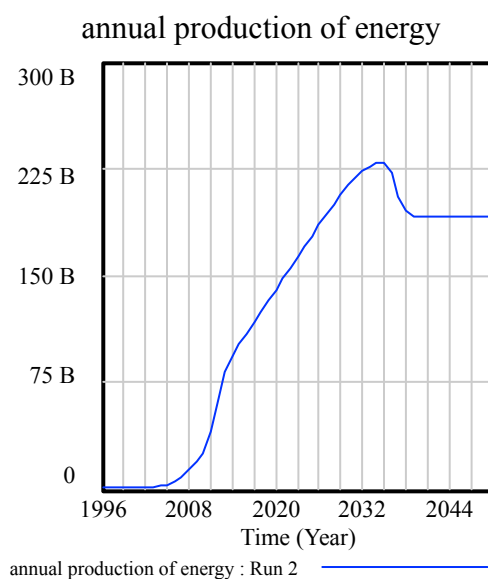
### 6.2.2 Escenario 2: estancamiento en las instalaciones

Este segundo escenario, representado como *Run 2* en el modelo dinámico en Vensim, supone que el flujo de instalaciones anual se mantiene constante desde 2014 hasta 2050 en torno a 7.014 millones de KW anuales.

Este flujo de estrada constante, genera que a largo plazo la capacidad acumulada se acabará estabilizando en torno a un valor constante. Además, como se observa en el gráfico a continuación, del Anexo C.2, el crecimiento es menos exponencial al resto de escenarios.

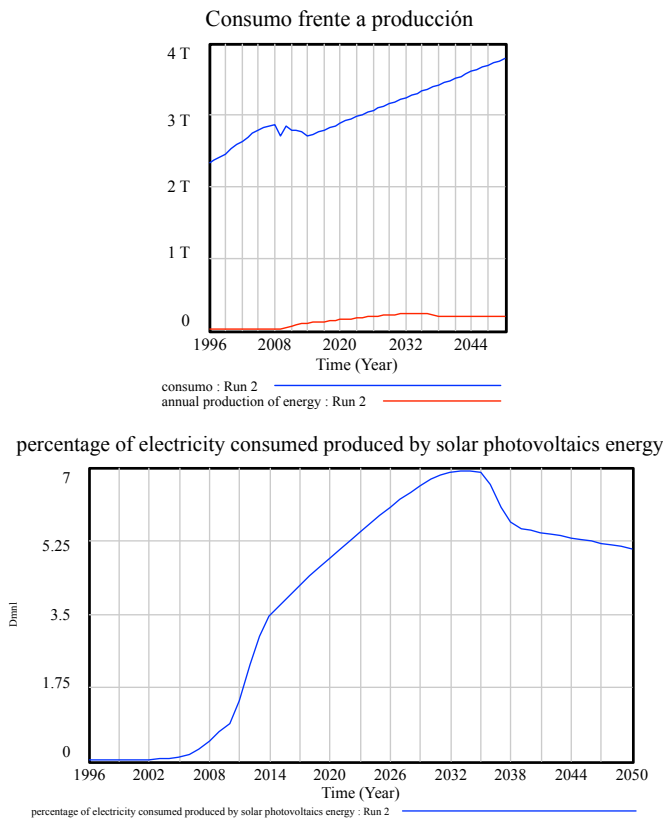


Al igual que la capacidad acumulada de instalaciones de energía solar fotovoltaica, la producción de energía también presentará cierto equilibrio con el tiempo, aunque en este caso se producirá más tarde que en la capacidad instalada. Esta producción de energía se estabilizará en torno a 191900GW anualmente, como se puede ver en la figura a continuación, del Anexo C.2.



Para finalizar el análisis del escenario 2, podemos observar como la producción anual de energía no crece mucho en comparación con 2014.

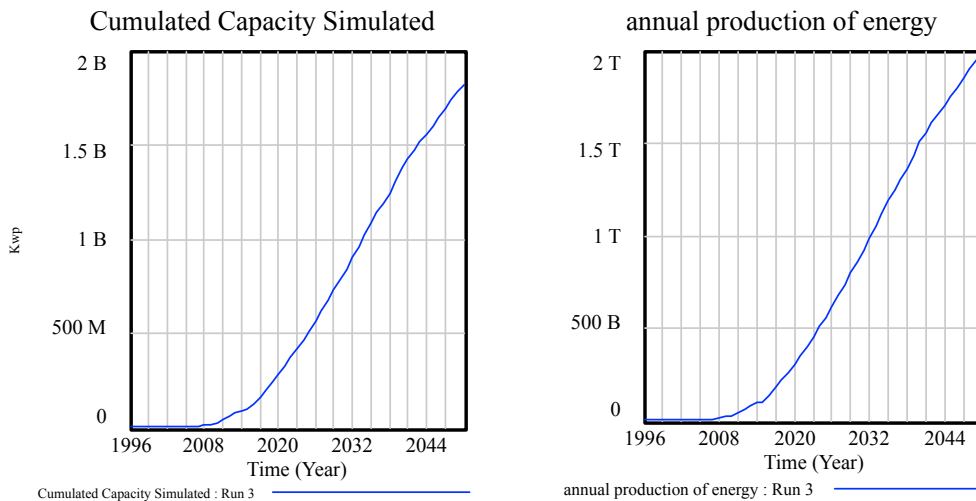
Además, si se compara frente al consumo se observa que no hay un crecimiento significativo a la hora de abastecer con electricidad a la UE, ya que solo aumenta hasta un 7% como mucho, pero después se estabiliza en torno al 5% de la electricidad total consumida anualmente por la UE. Como se puede ver en las imágenes que siguen el texto, reflejadas en el Anexo C.2.



### 6.2.3 Escenario 3: doble crecimiento frente al BAU

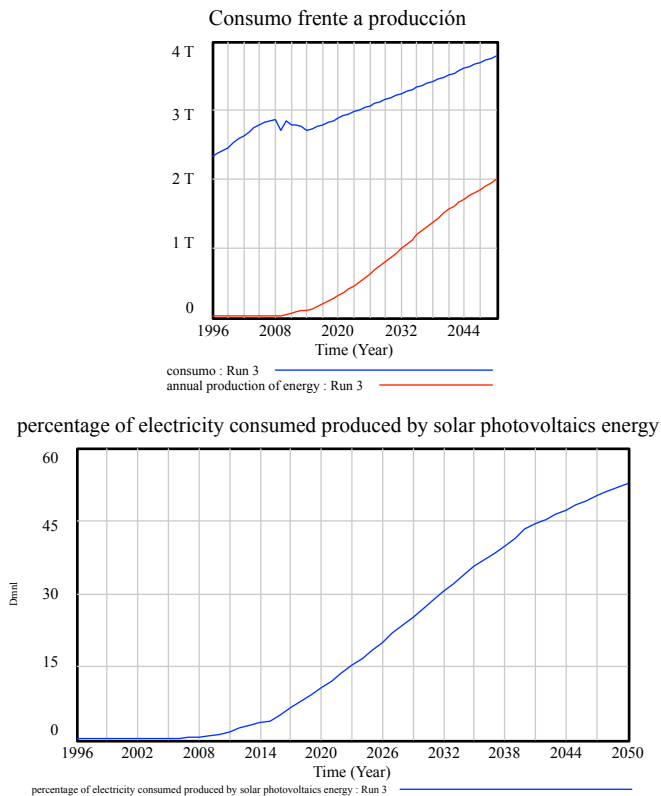
Este escenario se representa en el modelo dinámico como *Run 3*, y podría resumirse con un comportamiento similar al del escenario 1 pero duplicando la mayoría de los valores de las variables del modelo.

El crecimiento lineal en el flujo de instalaciones anuales genera un aumento de carácter más exponencial y menos lineal, tanto en la capacidad instalada como en la producción de energía. Cada una de ellas llega a cerca de 2000 GWp y 2 trillones KWh, respectivamente. Estas variables se observan con detalle en las gráficas a continuación, pertenecientes al Anexo C.2.



Y al igual que en los casos anteriores para finalizar el análisis de este último escenario, se ha estudiado la capacidad de abastecer con electricidad a la Unión Europea.

En este caso la producción crece con mayor rapidez que el consumo, y por lo tanto el porcentaje de electricidad capaz de suministrar con energía solar fotovoltaica será mayor que en los escenarios 1 y 2. Estableciéndose ese porcentaje en torno al 53% de las necesidades en 2050. Estas últimas variables estudiadas muestran su representación gráfica a continuación, comprendidas en el Anexo C.2.





## 7. Conclusiones

El propósito principal de este trabajo ha sido el de analizar la capacidad de la Unión Europea de abastecerse con energía solar fotovoltaica para hacer frente a la demanda de electricidad y de combustibles fósiles.

Como consecuencia se entiende que la UE será capaz de suministrar más energía solar que hasta ahora y, además, se ofrecen distintas alternativas para conseguirlo. Cada alternativa supone un distinto método de acción, por lo tanto, diferentes medidas serán tomadas en cada caso.

En concordancia con lo supuesto, la Unión Europea deberá seguir un plan futuro de acción en conjunción entre los distintos países, asimismo será necesaria la inversión de capitales, tanto económicos como de conocimiento, en la energía solar fotovoltaica.

El crecimiento del sector fotovoltaico y los distintos factores que afectan al desarrollo como se ha visto en el modelo, siguen la misma línea de los trabajos [40], [41]. Aunque su análisis de la energía fotovoltaica estuvo dirigido hacia otros puntos de interés.

Después de analizar este trabajo se concluye que la importancia del desempeño de los paneles es irrefutable, por consiguiente, una alternativa de apoyo a las vistas en este trabajo será la mejora en la eficiencia de los paneles en el futuro. Con un mayor rendimiento de los paneles solares, la producción de las actuales instalaciones fotovoltaicas incrementaría y favorecería la consecución de los objetivos futuros con mayor agilidad.

Por último, añadir que el uso de este modelo dinámico se puede ampliar hacia otros factores que afectan al sector. Para un análisis de factores emergentes en el futuro o para análisis de factores menos determinantes que los del modelo estudiado en este trabajo.



## Bibliografía

- [1] *Population growth*. (s.f.). n/a. En *Wikipedia*. Recuperado el 12 de marzo de 2017 de [https://en.wikipedia.org/wiki/Population\\_growth](https://en.wikipedia.org/wiki/Population_growth)
- [2] *International Energy Outlook 2016. Chapter 1. World energy demand and economic outlook*. (2015). n/a. En *EPA, United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 26 de junio de 2017 de <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- [3] *A blanket around the Earth*. (s.f.). n/a. En *NASA, global climate change*. Recuperado el 29 de abril de 2017 de <https://climate.nasa.gov/causes/>
- [4] *Overview of greenhouse gases. Carbon dioxide emissions*. (2 de diciembre de 2012). *The global carbon budget 1959–2011*. En *Earth System Science Data Discussions*, 5(2), pp. 1107-1157. Recuperado el 22 de junio de 2017 de <http://boris.unibe.ch/63556/>
- [5] Green, D. (22 de abril de 2012). *Solar energy facts – solar energy alone can power the world!* En *Renewable Green Energy Power*. Recuperado el 16 de abril de 2017 de <http://www.renewablegreenenergypower.com/solar-energy-facts-solar-energy-alone-can-power-the-world/>
- [6] Comisión Europea. (2014). *2020-2030 climate & energy package and framework*. En *European Commission*. Recuperado el 15 de mayo de 2017 de [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en)
- [7] International Energy Agency. (29 de septiembre de 2014). *About solar photovoltaics*. En *IEA, International Energy Agency*. Recuperado el 20 de junio de 2017 de <http://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/solar/>
- [8] IRENA: Weckend, S., IEA-PVPS: Wade, A., & Heath, G. (Junio de 2016). *END-OF-LIFE MANAGEMENT. Solar Photovoltaic Panels*. En *IRENA*. Recuperado el 20 de junio de 2017 de [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_IEAPVPS\\_End-of-Life\\_Solar\\_PV\\_Panels\\_2016.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf)
- [9] Center for Sustainable Systems, University of Michigan. (agosto de 2016). *Photovoltaic Energy*. En *css.umich.edu*. Recuperado 26 de abril de 2017 de [http://css.umich.edu/sites/default/files/Photovoltaic\\_Energy\\_Factsheet\\_CSS\\_07-08.pdf](http://css.umich.edu/sites/default/files/Photovoltaic_Energy_Factsheet_CSS_07-08.pdf)

- [10] Satell, G. (1 de abril de 2016). *Why energy storage may be the most important technology in the world right now*. En *Forbes*. Recuperado 22 de junio de 2017 de <https://www.forbes.com/forbes/welcome/?toURL=https://www.forbes.com/sites/gregsatell/2016/04/01/why-energy-storage-may-be-the-most-important-technology-in-the-world-right-now/>
- [11] Green, D. (3 de agosto de 2014). *Solar inverters*. En *Renewable Green Energy Power*. Recuperado el 14 de mayo de 2017 de <http://www.renewablegreenenergypower.com/solar-inverters/>
- [12] [Mapas solares]. (2014). En *Solargis*. Recuperado el 10 de mayo de 2017 de <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/europe>
- [13] Moxnes, E. (2009). *Presidential address Albuquerque 2009 Diffusion of System Dynamics*. En *systemdynamics.org*. Recuperado el 12 de mayo de 2017 de <http://www.systemdynamics.org/conferences/2009/proceed/papers/P1449.pdf>
- [14] Chichakly, K. (9 de marzo de 2016). *Limits to Growth*. En *blog.iseesystems.com*. Recuperado el 13 de mayo de 2017 de <http://blog.iseesystems.com/stella-ithink/limits-to-growth/>
- [15] *Renewables 2017. Global Status Report*. (2017). REN21. *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*. En *ren21.net*. Recuperado el 25 de mayo de 2017 de [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399\\_GSR\\_2017\\_Full\\_Report\\_0621\\_Opt.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf)
- [16] International Renewable Energy Agency, IRENA. (2015). *Renewable Power Generation Costs in 2014*. En *irena.org*. Recuperado el 29 de mayo de 2017 de [https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_RE\\_Power\\_Costs\\_2014\\_report.pdf](https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf)
- [17] Fthenakis, V., & Alsema, E. (2006). *Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004–early 2005 Status*. En *Ecolo.org*. Recuperado el 29 de mayo de 2017 de [http://ecolo.org/documents/documents\\_in\\_english/Solar-PV\\_Payback\\_Time-08.pdf](http://ecolo.org/documents/documents_in_english/Solar-PV_Payback_Time-08.pdf)

- [18] Haraldsson, H. V., Belyazid, S., & Sverdrup, H. U. (1 de junio de 2006). *Causal Loop Diagrams – promoting deep learning of complex Systems in engineering education*. En *lth.se*. Recuperado el 20 de mayo de 2016 de [https://www.lth.se/fileadmin/lth/genombrottet/konferens2006/Haraldsson\\_etal\\_bidrag.pdf](https://www.lth.se/fileadmin/lth/genombrottet/konferens2006/Haraldsson_etal_bidrag.pdf)
- [19] Sterman, J.D. (2000). *Business Dynamics. Systems thinking and modelling for a complex world*. Irwin McGraw-Hill
- [20] European Commission. (2003). *Energy: Yearly Statistics*. En *ec.europa.eu/eurostat*. Recuperado el 10 de marzo de 2017 de <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5643601/KS-CN-03-001-3A-EN.PDF/de68cb8b-1e4a-49b1-a8fc-c4c223af25cf>
- [21] European Commission. (2009). *Energy: Yearly Statistics*. En *ec.europa.eu/eurostat*. Recuperado el 10 de marzo de 2017 de <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5714958/KS-PC-09-001-EN.PDF/cabef0ba-1d75-4480-9fa8-54f63a3a724f>
- [22] *Photovoltaic Barometer 2010. EurObserv'ER*. (2010). n/a. En *euroobserver.org*. Recuperado el 10 de marzo de 2017 de <https://www.euroobserver.org/photovoltaic-barometer-2010/>
- [23] *Photovoltaic Barometer 2011. EurObserv'ER*. (2011). n/a. En *euroobserver.org*. Recuperado el 10 de marzo de 2017 de <https://www.euroobserver.org/photovoltaic-barometer-2011/>
- [24] *Photovoltaic Barometer 2012. EurObserv'ER*. (2012). n/a. En *euroobserver.org*. Recuperado el 10 de marzo de 2017 de <https://www.euroobserver.org/photovoltaic-barometer-2012/>
- [25] *Photovoltaic Barometer 2013. EurObserv'ER*. (2013). n/a. En *euroobserver.org*. Recuperado el 10 de marzo de 2017 de <https://www.euroobserver.org/photovoltaic-barometer-2013/>
- [26] *Photovoltaic Barometer 2014. EurObserv'ER*. (2014). n/a. En *euroobserver.org*. Recuperado el 10 de marzo de 2017 de <https://www.euroobserver.org/photovoltaic-barometer-2014/>
- [27] *Photovoltaic Barometer 2015. EurObserv'ER*. (2015). n/a. En *euroobserver.org*. Recuperado el 10 de marzo de 2017 de <https://www.euroobserver.org/photovoltaic-barometer-2015/>

- [28] *Photovoltaic Barometer 2016*. EurObserv'ER. (2016). n/a. En *euroobserver.org*. Recuperado el 10 de marzo de 2017 de <https://www.euroobserver.org/photovoltaic-barometer-2016/>
- [29] International Energy Agency, IEA. (2010). *Solar photovoltaic roadmap*. OECD, International Energy Agency. En *iea.org*. Recuperado el 29 de mayo de 2017 de [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv\\_roadmap.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv_roadmap.pdf)
- [30] Google Finance. (2017). *Us Dollar: Currency*. En *google.com*. Recuperado el 30 de mayo de 2017 de <https://www.google.com/finance?q=USDEUR&ei=0dJTWcHeH5mLsQGGqJbwCQ>
- [31] International Energy Agency, IEA. (2010). *Solar photovoltaic roadmap*. OECD, International Energy Agency. En *iea.org*. Recuperado el 29 de mayo de 2017 de [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv\\_roadmap.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/pv_roadmap.pdf)
- [32] *Capacity factor*. (2013). n/a. En *energymag.net*. Recuperado el 29 de mayo de 2017 de <https://energymag.net/capacity-factor/>
- [33] NREL, National Renewable Energy Laboratory. (2016). *Energy analysis-Utility Scale Energy Technology capacity factors*. En *nrel.gov*. Recuperado el 29 de mayo de 2017 de [http://www.nrel.gov/analysis/tech\\_cap\\_factor.html](http://www.nrel.gov/analysis/tech_cap_factor.html)
- [34] Sári, M., Huld, T., A., Dunlop, E., D., & Ossenbrink, H., A. (2006). *Potential of solar electricity generation in the European Union member States and candidate countries*. En *sciencedirect.com*. Recuperado el 2 de junio de 2017 de [http://web.mit.edu/cron/Backup/project/urban-sustainability/Old\\_files\\_from\\_summer\\_2009/Bjorn/solar/Potential\\_of\\_solar\\_electricity\\_generation\\_EU.pdf](http://web.mit.edu/cron/Backup/project/urban-sustainability/Old_files_from_summer_2009/Bjorn/solar/Potential_of_solar_electricity_generation_EU.pdf)
- [35] International Energy Agency, IEA. (2014). *Technology roadmap. Solar Photovoltaic energy*. En *iea.org*. Recuperado el 2 de junio de 2017 de [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy\\_2014edition.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf)
- [36] Maghami, M., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M., Rezadad, M., & Hajjghorbani, S. (2017). *Power loss due to soiling on solar panel: A review*. En

sciencedirect.com. Recuperado el 29 de mayo de 2017 de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000745>

[37] *How to calculate the Surface área required by solar Panels*. RAYmaps. (2013). n/a. En *raymaps.com*. Recuperado el 4 de junio de 2017 de <http://www.raymaps.com/index.php/how-to-calculate-the-area-required-by-solar-panels/>

[38] International Energy Agency, IEA. (2017). *World energy statistics*. En *IEA World Energy Statistics and Balances* (database). Recuperado el 6 de marzo de 2017 de <http://dx.doi.org/10.1787/data-00510-en>

[39] International Energy Agency, IEA. (2017). *World energy statistics*. En *IEA World Energy Statistics and Balances* (database). Recuperado el 3 de abril de 2017 de <http://dx.doi.org/10.1787/data-00510-en>

[40] Movilla, S. (2009). *Master Thesis. Photovoltaic energy market in Spain: A System Dynamics Approach for Policy Development*. University of Bergen.

[41] Uzquiza, J. (2015). *Bachelor Thesis. Analysis of the materials used in solar cells production with the current and the promising technologies: a System dynamics approach*. University of Bergen.

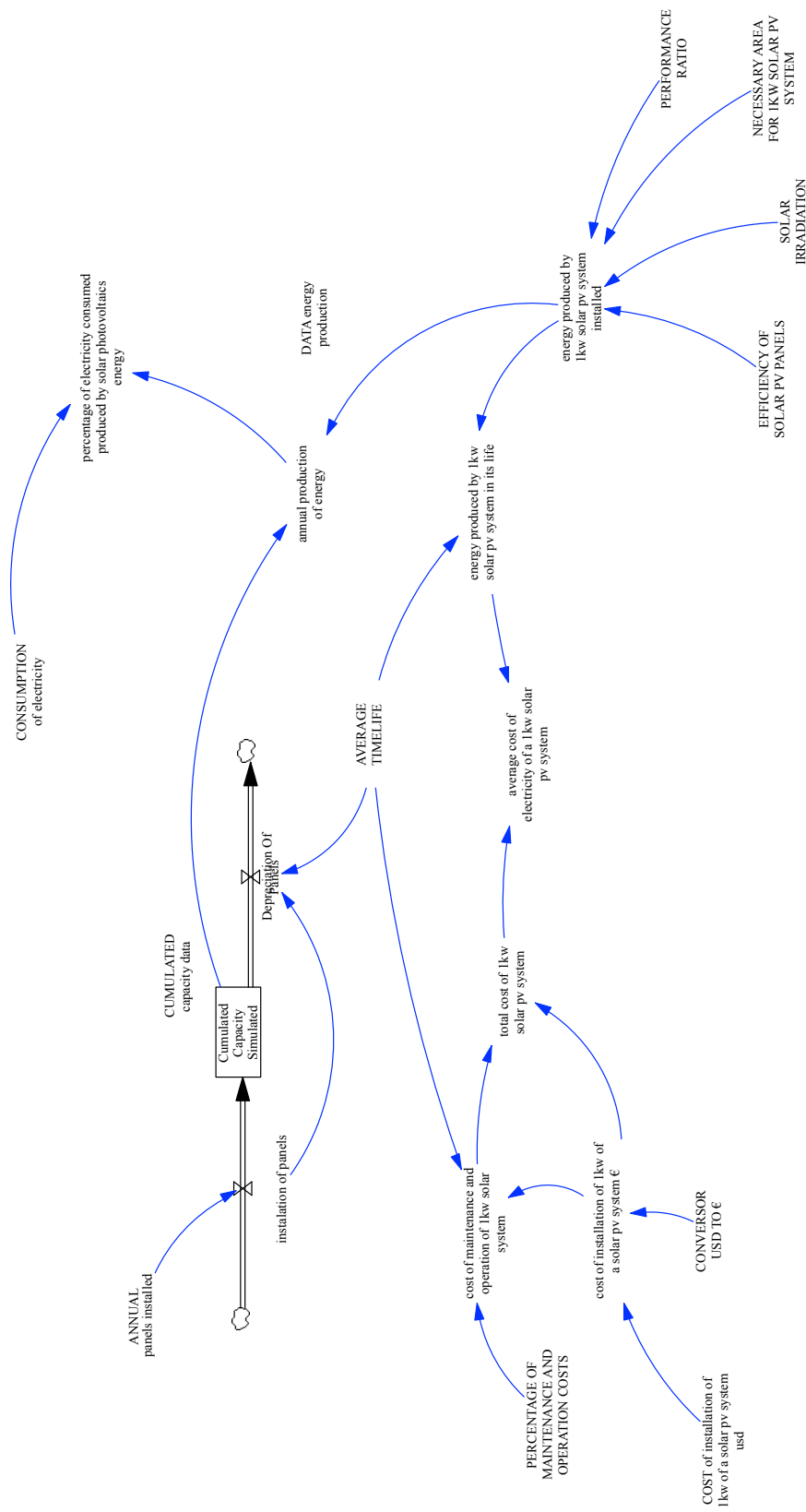
[42] Movilla, S. & Miguel, L.J. (2009). *Mercado fotovoltaico español basado en dinámica de sistemas*. ERA SOLAR. 150.





# Anexos

## Anexo A.1: El modelo dinámico con datos históricos



## Anexo A.2: Las ecuaciones

data energy production:INTERPOLATE:

~  
~ |

Average cost of electricity of a 1kw solar pv system=

Total cost of 1kw solar pv system/Energy produced by 1kw solar pv system in its life

~ €/KWh  
~ |

Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics energy=

(Annual production of energy/Consumption of electricity)\*100

~ Dmnl  
~ |

Annual production of energy=

energy produced by 1kw solar pv system installed\*cumulated capacity simulated

~  
~ |

cumulated capacity data:INTERPOLATE:

~  
~ |

Instalation of panels=

annual panels installed

~ KWh

Each year the installation of panels will grow due to the growth ratio

|

Depreciation of panels=

DELAY FIXED( Instalation of panels , Average timelife , 0 )

~ KWh/Year

~ |

Consumption of electricity:INTERPOLATE:

~ KWh  
~ |

Conversor USD to €=

0.9

~ €/USD

~ Source: Google finance. 1 US Dollar is 0,90 €

|

Efficiency of solar pv panels=

0.2

~ Dmnl

~ According to the IEA (International Energy Agency) and its Roadmap 2050, \

the performance of the panels depends on the type of panel used. And the \

most common ones, which we will consider for this thesis, have an \

efficiency around the 15-20%.

|

Energy produced by 1kw solar pv system in its life=

energy produced by 1kw solar pv system installed\*Average timelife

~ KWh

~

|

Total cost of 1kw solar pv system=

Cost of installation of 1kw of a solar pv system €+Cost of maintenance and operation of 1kw solar system

~ €

~ To calculate the total cost of a solar pv sytem we have to take care of \

the installation but also about the maintenance and operation

|

Necessary area for 1kw solar pv system=

5.7

~ m2

~

|

Cost of installation of 1kw of a solar pv system €=

Cost of installation of 1KW of a solar PV system USD\*Conversor USD to €

~ €

~

|

Cost of maintenance and operation of 1kw solar system=  
 Percentage of maintenance and operation costs\*Cost of installation of  
 1kw of a solar pv system €\  
 ~ \*Average timelife  
 ~ €  
 ~ The total cost of maintenance and operation of a 1kw solar pv  
 system \  
 ~ during all its life.  
 |

Solar irradiation=  
 1200  
 ~ KWh/m2/Year  
 ~ We are first considering the irradiation of Europe, and the  
 average \  
 ~ according to the IRENA document of Renewable Energy  
 Technologies: Cost \  
 ~ Analysis Series is around 1200Kwh/sqm/year  
 |

energy produced by 1kw solar pv system installed=  
 Solar irradiation\*Efficiency of solar pv panels\*Performance  
 ratio\*Necessary area for 1kw solar pv system  
 ~ KWh/Year  
 ~ |

Performance ratio=  
 0.8  
 ~ Dmnl  
 ~ The perofrmance of the panels will count with the losses of  
 them, such \  
 ~ as, inverters, temperature, shadings, dust, AC/DC losses... For  
 this \  
 ~ particular case we count with losses of around the 20% and so  
 the \  
 ~ performance will be reduced to the 80%  
 |

Cost of installation of 1KW of a solar PV system USD:INTERPOLATE:  
 ~ USD  
 ~ Source: IRENA  
 |

Percentage of maintenance and operation costs=

0.01

~ Dmnl/Year

~ According to the Roadmap 2050 written by the IEA (International Energy \

Agency) the percentage of the cost of the maintenance and operation \

activities of solar panels is really low, around 1% of the investments \

each year.

|

cumulated capacity simulated= INTEG (

Installation of panels-Depreciation of panels,  
40000)

~ KWp

~ The initial value is the capacity installed in 1996 when this model starts \

to develop.

|

annual panels installed

~ KWh

~ |

Average timelife=

25

~ Year

~ The panels timelife is estimated to be between 20 to 30 years. I suppose \

the average timelife of 25 years

|

\*\*\*\*\*

.Control

\*\*\*\*\*

~

Simulation Control Parameters

|

FINAL TIME = 2014

~ Year

~ The final time for the simulation.  
|

INITIAL TIME = 1996

~ Year  
~ The initial time for the simulation.  
|

SAVEPER =

TIME STEP

~ Year [0,?]  
~ The frequency with which output is stored.  
|

TIME STEP = 1

~ Year [0,?]  
~ The time step for the simulation.  
|

\\--/// Sketch information - do not modify anything except names

V300 Do not put anything below this section - it will be ignored

\*View 1

\$192-192-192,0,Times New Roman|12||0-0-0|0-0-0|0-0-255|-1-1-1|-1-1-1|72,72,5,0

11,1,0,304,237,6,8,34,131,0,0,1,0,0,0

10,2,Instalation of panels,304,272,51,8,40,131,0,0,-1,0,0,0

10,3,cumulated capacity simulated,443,233,40,20,3,3,0,0,0,0,0,0

10,4,Average timelife,708,350,48,18,8,131,0,0,0,0,0,0

1,5,1,3,4,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(356,237)|

12,6,48,693,240,10,8,0,3,0,0,-1,0,0,0

1,7,9,6,4,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(635,244)|

1,8,9,3,100,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(529,244)|

11,9,48,581,244,6,8,34,131,0,0,1,0,0,0

10,10,Depreciation of panels,581,262,54,10,40,131,0,0,-1,0,0,0

1,11,4,10,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(613,321)|

10,12,annual panels installed,191,146,42,13,8,131,0,0,0,0,0,0

1,13,12,1,1,0,0,0,64,0,-1-1-1,,1|(261,178)|

10,14,Percentage of maintenance and operation costs,103,509,62,21,8,3,0,0,0,0,0,0

10,15,Cost of installation of 1KW of a solar PV system USD,80,666,64,21,8,3,0,0,0,0,0,0

10,16,Cost of maintenance and operation of 1kw solar system,264,453,62,21,8,3,0,0,0,0,0,0

1,17,14,16,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(161,458)|  
 1,18,4,16,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(493,382)|  
 10,19,Conversor USD to €,267,653,40,14,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,20,Cost of installation of 1kw of a solar pv system  
 €,275,562,73,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,21,15,20,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(149,602)|  
 1,22,19,20,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(282,619)|  
 1,23,20,16,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(308,501)|  
 10,24,Total cost of 1kw solar pv system,479,477,48,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,25,20,24,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(429,546)|  
 1,26,16,24,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(382,448)|  
 10,27,Efficiency of solar pv panels,1024,709,56,14,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,28,Solar irradiation,1164,728,42,14,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,29,Necessary area for 1kw solar pv  
 system,1291,711,60,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,30,Performance ratio,1309,622,48,14,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,31,energy produced by 1kw solar pv system  
 installed,1087,539,62,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,32,27,31,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1071,630)|  
 1,33,28,31,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1149,637)|  
 1,34,29,31,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1220,612)|  
 1,35,30,31,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1212,566)|  
 10,36,Energy produced by 1kw solar pv system in its  
 life,905,450,73,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,37,31,36,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1041,476)|  
 1,38,4,36,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(831,390)|  
 10,39,Average cost of electricity of a 1kw solar pv  
 system,690,491,64,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,40,24,39,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(597,471)|  
 1,41,36,39,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(803,463)|  
 10,42,Annual production of energy,922,297,52,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,43,3,42,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(694,194)|  
 1,44,31,42,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1071,406)|  
 10,45,Consumption of electricity,746,47,51,21,8,131,0,0,0,0,0,0  
 10,46,Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics  
 energy,1034,111,93,28,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,47,45,46,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(866,31)|  
 1,48,42,46,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(997,221)|  
 12,49,48,188,235,10,8,0,3,0,0,-1,0,0,0  
 1,50,1,49,100,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(248,237)|  
 1,51,2,10,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(443,320)|  
 10,52,cumulated capacity data,493,179,49,14,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,53,data energy production,1078,301,44,14,8,3,0,0,0,0,0,0

\\--/// Sketch information - do not modify anything except names

V300 Do not put anything below this section - it will be ignored

\*View 2

\$192-192-192,0,Times New Roman|12||0-0-0|0-0-0|0-0-255|-1-1-1|-1-1-1|72,72,100,0

12,1,16887880,292,-644,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0

Instalation of panels,Graph

12,2,16888132,639,-647,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0

cumulated capacity simulated,Graph

12,3,16888136,961,-648,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0

Cost of maintenance and operation of 1kw solar system,Graph

12,4,16888140,289,-324,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0

Total cost of 1kw solar pv system,Graph

12,5,16888144,637,-313,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0

Average cost of electricity of a 1kw solar pv system,Graph

12,6,16888148,959,-317,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0

Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics energy,Graph

12,7,16888152,1282,-312,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0

Consumption of electricity,Graph

12,8,16888156,456,56,339,210,3,188,0,0,2,0,0,0

cumulated capacity simulated,Table

12,9,16888164,966,24,150,150,3,44,0,0,1,0,0,0

capacity

12,10,16888168,342,440,209,166,3,188,0,0,1,0,0,0

Production\_of\_Energy

12,11,16888172,795,446,215,171,3,188,0,0,2,0,0,0

Average cost of electricity of a 1kw solar pv system,Graph

12,12,16888176,410,802,288,168,3,188,0,0,2,0,0,0

Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics energy,Graph

\\--/// Sketch information - do not modify anything except names

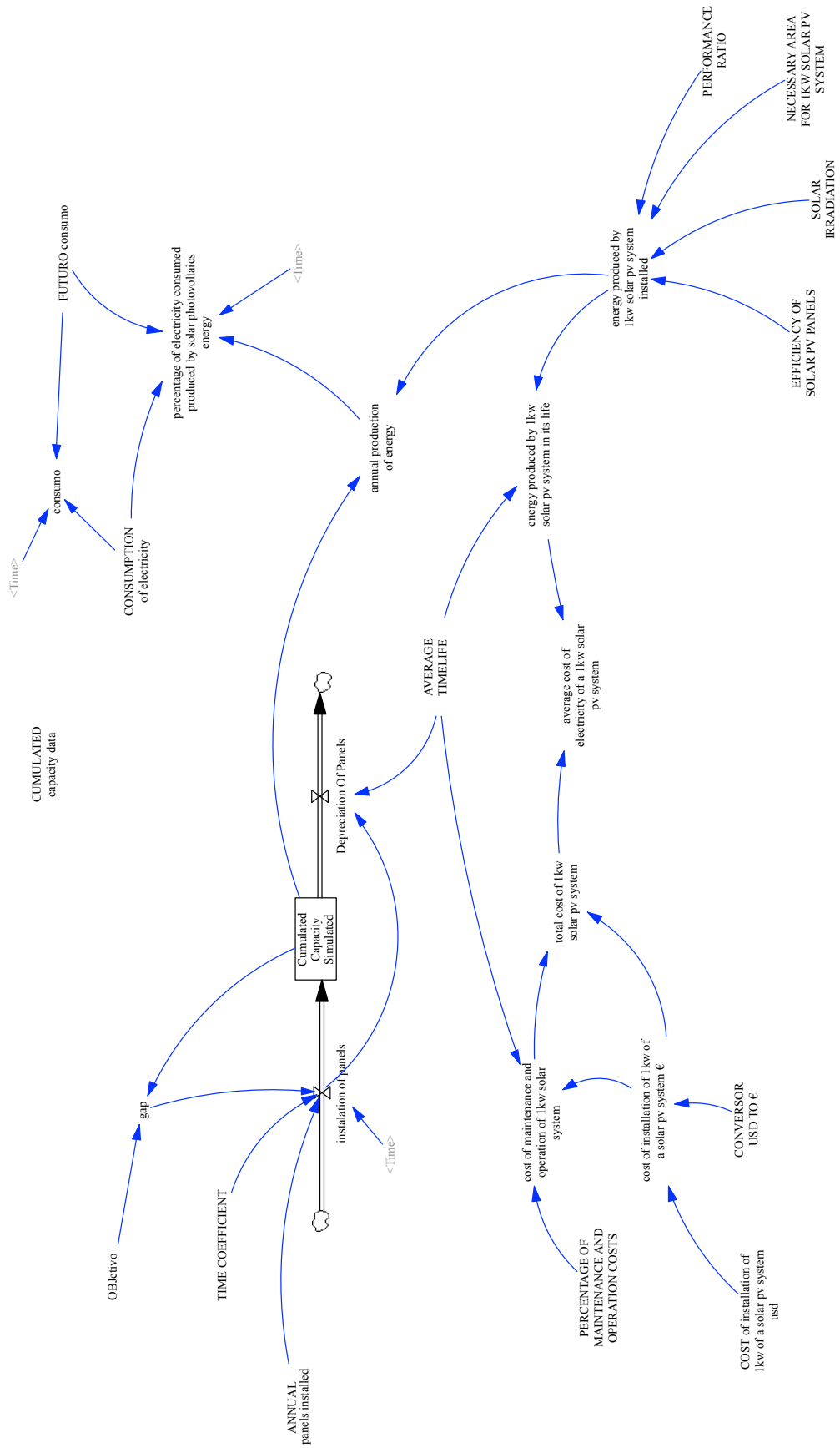
V300 Do not put anything below this section - it will be ignored

\*View 3

\$192-192-192,0,Times New Roman|12||0-0-0|0-0-0|0-0-255|-1-1-1|-1-1-1|72,72,100,0



# Anexo B.1: El modelo dinámico con estrategia A



## Anexo B.2: Las ecuaciones

Consumo=

IF THEN ELSE( Time<2015 , Consumption of electricity , Futuro consumo )

~

~

|

Objetivo:INTERPOLATE:

~ KWh

~ Descrito en el informe de la IEA (International Energy Agency)

sobre \

energía solar fotovoltaica, roadmap 2014.

|

Instalation of panels=

IF THEN ELSE( Time<2015 , annual panels installed , GAP/Time coefficient )

~ KWh

~ Each year the installation of panels will grow due to the growth

ratio

|

Time coefficient=

1

~ Year

~

|

GAP=

Objetivo-cumulated capacity simulated

~ KWh

~

|

Futuro consumo:INTERPOLATE:

~

~

|

Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics energy=

IF THEN ELSE( Time<2015 , (Annual production of energy/Consumption of electricity)\*100\

, (Annual production of energy/Futuro consumo)\*100 )

~ Dmnl

~

|

Depreciation of panels=

DELAY FIXED( Instalation of panels, Average timelife, 0)

~ KWh/Year

~ |

cumulated capacity simulated= INTEG (

Instalation of panels-Depreciation of panels,

40000)

~ KWp

~ The initial value is the capacity installed in 1996 when this model starts \

to develop.

|

Cumulated capacity data:INTERPOLATE:

~

~ |

Consumption of electricity:INTERPOLATE:

~ KWh

~ |

Annual production of energy=

energy produced by 1kw solar pv system installed\*cumulated capacity simulated

~

~ |

Conversor USD to €=

0.9

~ €/USD

~ Source: Google finance. 1 US Dollar is 0,90 €

|

Efficiency of solar pv panels=

0.2

~ Dmnl

~ According to the IEA (International Energy Agency) and its Roadmap 2050, \

the performance of the panels depends on the type of panel used. And the \

most common ones, which we will consider for this thesis, have an efficiency around the 15-20%.

Average cost of electricity of a 1kw solar pv system=

Total cost of 1kw solar pv system/Energy produced by 1kw solar pv system in its life

~ €/KWh

~ |

Energy produced by 1kw solar pv system in its life=

energy produced by 1kw solar pv system installed\*Average timelife

~ KWh

~ |

Total cost of 1kw solar pv system=

Cost of installation of 1kw of a solar pv system €+Cost of maintenance and operation of 1kw solar system

~ €

To calculate the total cost of a solar pv sytem we have to take care of \

the installation but also about the maintenance and operation

|

Necessary area for 1kw solar pv system=

5.7

~ m2

~ |

Cost of installation of 1kw of a solar pv system €=

Cost of installation of 1KW of a solar PV system USD\*Conversor USD to €

~ €

~ |

Cost of maintenance and operation of 1kw solar system=

Percentage of maintenance and operation costs\*Cost of installation of 1kw of a solar pv system €\

\*Average timelife

~ €

The total cost of maintenance and operation of a 1kw solar pv system \

during all its life.

|

Solar irradiation=

1200

~ KWh/m<sup>2</sup>/Year

~ We are first considering the irradiation of Europe, and the average \

Technologies: Cost \

Analysis Series is around 1200Kwh/sqm/year

|

energy produced by 1kw solar pv system installed=

Solar irradiation\*Efficiency of solar pv panels\*Performance ratio\*Necessary area for 1kw solar pv system

~ KWh/Year

~ |

Performance ratio=

0.8

~ Dmnl

~ The performance of the panels will count with the losses of them, such \

this \

the \

as, inverters, temperature, shadings, dust, AC/DC losses... For particular case we count with losses of around the 20% and so performance will be reduced to the 80%

|

Cost of installation of 1KW of a solar PV system USD:INTERPOLATE:

~ USD

~ Source: IRENA

|

Percentage of maintenance and operation costs=

0.01

~ Dmnl/Year

~ According to the Roadmap 2050 written by the IEA (International Energy \

operation \

activities of solar panels is really low, around 1% of the investments \ each year.

|

annual panels installed

~ KWh

~ |

Average timelife=

25

~ Year

~ The panels timelife is estimated to be between 20 to 30 years. I

suppose \

the average timelife of 25 years

|

\*\*\*\*\*

.Control

\*\*\*\*\*

~

Simulation Control Parameters

|

FINAL TIME = 2050

~ Year

~ The final time for the simulation.

|

INITIAL TIME = 1996

~ Year

~ The initial time for the simulation.

|

SAVEPER =

TIME STEP

~ Year [0,?]

~ The frequency with which output is stored.

|

TIME STEP = 1

~ Year [0,?]

~ The time step for the simulation.

|

\\--/// Sketch information - do not modify anything except names

V300 Do not put anything below this section - it will be ignored

\*View 1

\$192-192-192,0,Times New Roman|12||0-0-0|0-0-0|0-0-255|-1-1-1|-1-1-1|72,72,5,0

11,1,0,378,382,6,8,34,131,0,0,1,0,0,0

10,2,Instalation of panels,378,401,66,11,40,131,0,0,-1,0,0,0

10,3,cumulated capacity simulated,528,376,40,20,3,3,0,0,0,0,0,0

10,4,Average timelife,793,493,48,18,8,131,0,0,0,0,0,0

1,5,1,3,4,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(436,382)|

12,6,48,778,383,10,8,0,3,0,0,-1,0,0,0

1,7,9,6,4,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(720,380)|

1,8,9,3,100,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(614,380)|

11,9,48,667,380,6,8,34,3,0,0,1,0,0,0

10,10,Depreciation of panels,667,401,57,13,40,131,0,0,-1,0,0,0

1,11,4,10,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(697,467)|

10,12,annual panels installed,72,359,42,13,8,131,0,0,0,0,0,0

1,13,12,1,1,0,0,0,0,64,0,-1-1-1,,1|(252,345)|

10,14,Percentage of maintenance and operation costs,188,652,62,21,8,3,0,0,0,0,0,0

10,15,Cost of installation of 1KW of a solar PV system USD,165,809,64,21,8,3,0,0,0,0,0,0

10,16,Cost of maintenance and operation of 1kw solar system,349,596,62,21,8,3,0,0,0,0,0,0

1,17,14,16,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(246,601)|

1,18,4,16,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(578,525)|

10,19,Conversor USD to €,352,796,40,14,8,3,0,0,0,0,0,0

10,20,Cost of installation of 1kw of a solar pv system €,360,705,73,21,8,3,0,0,0,0,0,0

1,21,15,20,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(234,745)|

1,22,19,20,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(367,762)|

1,23,20,16,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(393,644)|

10,24,Total cost of 1kw solar pv system,564,620,48,21,8,3,0,0,0,0,0,0

1,25,20,24,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(514,689)|

1,26,16,24,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(467,591)|

10,27,Efficiency of solar pv panels,1109,852,56,14,8,3,0,0,0,0,0,0

10,28,Solar irradiation,1249,871,42,14,8,3,0,0,0,0,0,0

10,29,Necessary area for 1kw solar pv system,1376,854,60,21,8,3,0,0,0,0,0,0

10,30,Performance ratio,1394,765,48,14,8,3,0,0,0,0,0,0

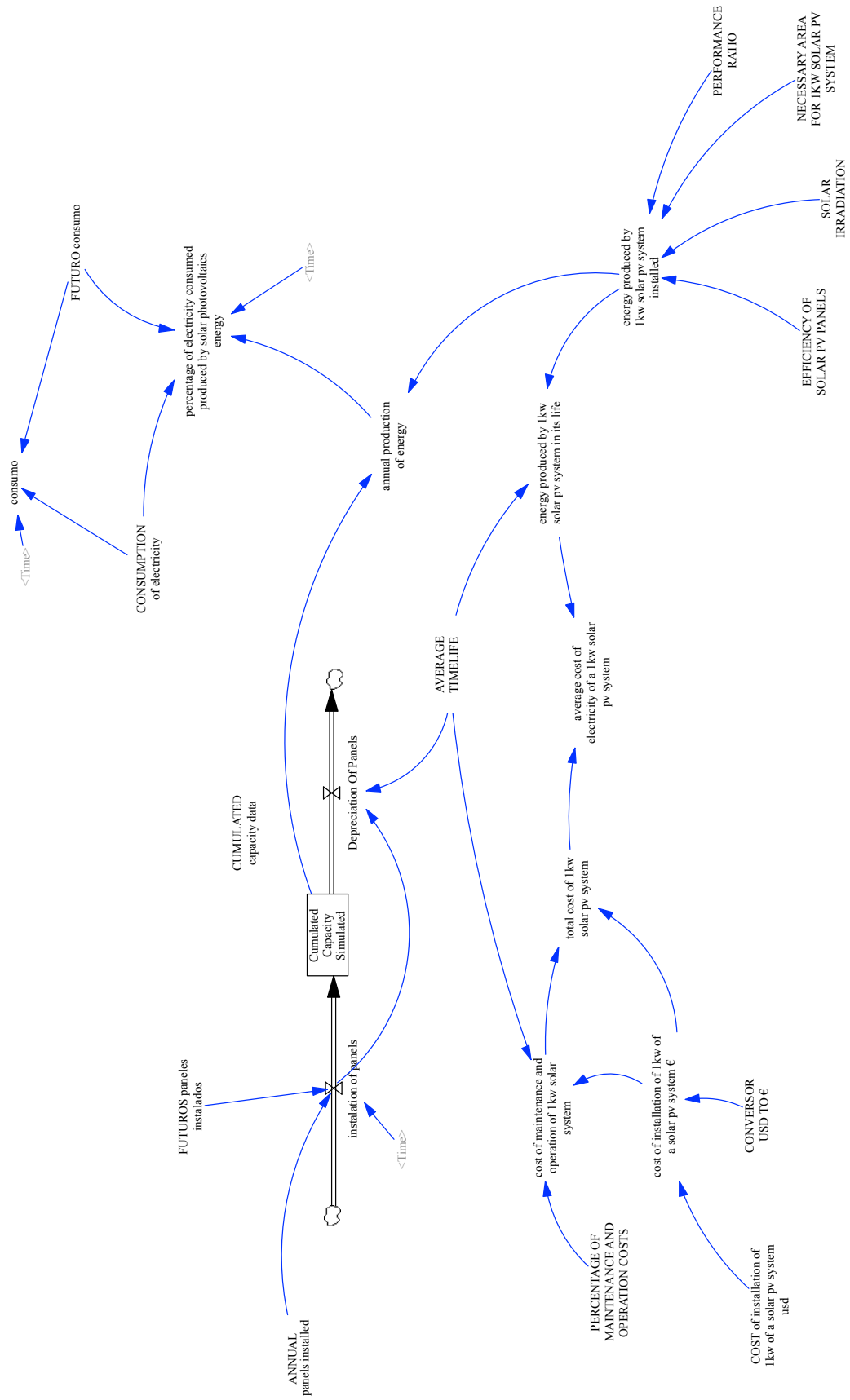
10,31,energy produced by 1kw solar pv system installed,1172,682,62,21,8,3,0,0,0,0,0  
 1,32,27,31,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1156,773)|  
 1,33,28,31,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1234,780)|  
 1,34,29,31,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1305,755)|  
 1,35,30,31,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1297,709)|  
 10,36,Energy produced by 1kw solar pv system in its life,990,593,73,21,8,3,0,0,0,0,0  
 1,37,31,36,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1126,619)|  
 1,38,4,36,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(916,533)|  
 10,39,Average cost of electricity of a 1kw solar pv system,775,634,64,21,8,3,0,0,0,0,0  
 1,40,24,39,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(682,614)|  
 1,41,36,39,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(888,606)|  
 10,42,Annual production of energy,1007,440,52,21,8,3,0,0,0,0,0  
 1,43,3,42,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(779,337)|  
 1,44,31,42,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1156,549)|  
 10,45,Consumption of electricity,887,201,51,21,8,131,0,0,0,0,0  
 10,46,Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics energy,1119,254,93,28,8,3,0,0,0,0,0  
 1,47,45,46,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(981,199)|  
 1,48,42,46,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1082,364)|  
 1,49,1,10,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(485,453)|  
 12,50,48,253,381,10,8,0,3,0,0,-1,0,0,0  
 1,51,1,50,100,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(317,382)|  
 10,52,Cumulated capacity data,698,111,49,14,8,3,0,0,0,0,0  
 10,53,Time,378,426,21,8,8,2,1,3,-1,0,0,0,128-128-128,0-0-0,|12||128-128-128  
 10,54,Time,318,449,21,8,8,2,0,3,-1,0,0,0,128-128-128,0-0-0,|12||128-128-128  
 1,55,54,2,0,0,0,0,64,0,-1-1-1,,1|(340,430)|  
 10,56,Futuro consumo,1196,130,58,8,8,3,0,0,0,0,0  
 1,57,56,46,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1132,188)|  
 10,58,Time,1186,359,21,8,8,2,0,3,-1,0,0,0,128-128-128,0-0-0,|12||128-128-128  
 1,59,58,46,0,0,0,0,64,0,-1-1-1,,1|(1162,322)|  
 10,60,Objetivo,199,178,31,8,8,3,0,0,0,0,0  
 10,61,GAP,361,207,14,8,8,3,0,0,0,0,0  
 10,62,Time coefficient,230,285,57,8,8,3,0,0,0,0,0  
 1,63,60,61,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(281,192)|  
 1,64,3,61,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(466,276)|  
 1,65,62,1,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(326,316)|  
 1,66,61,1,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(378,284)|



10,67,Consumo,964,123,32,8,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,68,45,67,0,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(926,160)|  
 1,69,56,67,0,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1073,126)|  
 10,70,Time,880,82,21,8,8,2,0,3,-1,0,0,0,128-128-128,0-0-0,|12||128-128-128  
 1,71,70,67,0,0,0,0,0,64,0,-1-1-1,,1|(915,99)|  
 \\--/// Sketch information - do not modify anything except names  
 V300 Do not put anything below this section - it will be ignored  
 \*View 2  
 \$192-192-192,0,Times New Roman|12||0-0-0|0-0-0|0-0-255|-1-1-1|-1-1-1|72,72,100,0  
 12,1,0,292,-372,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 Instalation of panels,Graph  
 12,2,0,639,-375,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 cumulated capacity simulated,Graph  
 12,3,0,961,-376,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 Cost of maintenance and operation of 1kw solar system,Graph  
 12,4,0,289,-52,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 Total cost of 1kw solar pv system,Graph  
 12,5,0,637,-41,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 Average cost of electricity of a 1kw solar pv system,Graph  
 12,6,0,959,-45,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics energy,Graph  
 12,7,0,1282,-40,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 Consumption of electricity,Graph  
 12,8,0,456,328,339,210,3,188,0,0,2,0,0,0  
 cumulated capacity simulated,Table  
 12,9,0,622,761,508,200,3,188,0,0,1,0,0,0  
 compare\_cumul  
 12,10,0,426,1126,310,150,3,188,0,0,1,0,0,0  
 Consumo  
 \\--/// Sketch information - do not modify anything except names  
 V300 Do not put anything below this section - it will be ignored  
 \*View 3  
 \$192-192-192,0,Times New Roman|12||0-0-0|0-0-0|0-0-255|-1-1-1|-1-1-1|72,72,100,0  
 12,1,50377272,340,-41,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 cumulated capacity simulated,Graph  
 12,2,50377488,671,-43,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 Annual production of energy,Graph  
 12,3,50377676,1001,-39,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 GAP,Graph

12,4,50377680,811,618,300,167,3,188,0,0,2,0,0,0  
Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics  
energy,Graph  
12,5,50377684,708,279,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
Instalation of panels,Graph  
12,6,50377688,1044,289,150,150,3,44,0,0,1,0,0,0  
Objetivo\_frente\_realidad  
12,7,50377692,349,599,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
Depreciation of panels,Graph  
12,8,50377696,1314,-43,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
Annual production of energy,Table  
12,9,50377704,270,271,150,150,3,44,0,0,1,0,0,0  
Consumo\_frente\_a\_producción

# Anexo C.1: El modelo dinámico con estrategia B



## Anexo C.2: Las ecuaciones

Consumo=

IF THEN ELSE( Time<2015 , Consumption of electricity , Futuro consumo )

~

~

|

FUTUROS paneles instalados:INTERPOLATE:

~

~

|

Instalation of panels=

IF THEN ELSE( Time<2015 , annual panels installed , FUTUROS paneles instalados )

~ KWh

~ Each year the installation of panels will grow due to the growth ratio

|

Futuro consumo:INTERPOLATE:

~

~

|

Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics energy=

IF THEN ELSE( Time<2015 , (Annual production of energy/Consumption of electricity)\*100\

, (Annual production of energy/Futuro consumo)\*100 )

~ Dmnl

~

|

Depreciation of panels=

DELAY FIXED( Instalation of panels, Average timelife, 0)

~ KWh/Year

~

|

cumulated capacity simulated= INTEG (

Instalation of panels-Depreciation of panels,

40000)

~ KWp

~ The initial value is the capacity installed in 1996 when this model starts \

to develop.

|

Cumulated capacity data:INTERPOLATE:

~

~

|

Consumption of electricity:INTERPOLATE:

~

KWh

~

|

Annual production of energy=

energy produced by 1kw solar pv system installed\*cumulated capacity simulated

~

~

|

Conversor USD to €=

0.9

~

€/USD

~

Source: Google finance. 1 US Dollar is 0,90 €

|

Efficiency of solar pv panels=

0.2

~

Dmnl

~

According to the IEA (International Energy Agency) and its Roadmap 2050, \

the performance of the panels depends on the type of panel used. And the \

most common ones, which we will consider for this thesis, have an \

efficiency around the 15-20%.

|

Average cost of electricity of a 1kw solar pv system=

Total cost of 1kw solar pv system/Energy produced by 1kw solar pv system in its life

~

€/KWh

~

|

Energy produced by 1kw solar pv system in its life=

energy produced by 1kw solar pv system installed\*Average timelife

~ KWh  
~ |

Total cost of 1kw solar pv system=

Cost of installation of 1kw of a solar pv system €+Cost of maintenance and operation of 1kw solar system

~ €

~ To calculate the total cost of a solar pv sytem we have to take care of \

the installation but also about the maintenance and operation

|

Necessary area for 1kw solar pv system=

5.7

~ m2

~ |

Cost of installation of 1kw of a solar pv system €=

Cost of installation of 1KW of a solar PV system USD\*Conversor USD to €

~ €

~ |

Cost of maintenance and operation of 1kw solar system=

Percentage of maintenance and operation costs\*Cost of installation of 1kw of a solar pv system €\

\*Average timelife

~ €

~ The total cost of maintenance and operation of a 1kw solar pv system \

during all its life.

|

Solar irradiation=

1200

~ KWh/m2/Year

~ We are first considering the irradiation of Europe, and the average \

according to the IRENA document of Renewable Energy Technologies: Cost \

Analysis Series is around 1200Kwh/sqm/year

|

energy produced by 1kw solar pv system installed=

Solar irradiation\*Efficiency of solar pv panels\*Performance ratio\*Necessary area for 1kw solar pv system

~ KWh/Year

~ |

Performance ratio=

0.8

~ Dmnl

~ The performance of the panels will count with the losses of them, such \

as, inverters, temperature, shadings, dust, AC/DC losses... For this \

particular case we count with losses of around the 20% and so the \

performance will be reduced to the 80%

|

Cost of installation of 1KW of a solar PV system USD:INTERPOLATE:

~ USD

~ Source: IRENA

|

Percentage of maintenance and operation costs=

0.01

~ Dmnl/Year

~ According to the Roadmap 2050 written by the IEA (International Energy \

Agency) the percentage of the cost of the maintenance and operation \

activities of solar panels is really low, around 1% of the investments \

each year.

|

annual panels installed

~ KWh

~ |

Average timelife=

25

~ Year

~ The panels timelife is estimated to be between 20 to 30 years. I  
 suppose \  
 the average timelife of 25 years  
 |

\*\*\*\*\*

.Control

\*\*\*\*\*

~

Simulation Control Parameters

|

FINAL TIME = 2050

~ Year

~ The final time for the simulation.

|

INITIAL TIME = 1996

~ Year

~ The initial time for the simulation.

|

SAVEPER =

TIME STEP

~ Year [0,?]

~ The frequency with which output is stored.

|

TIME STEP = 1

~ Year [0,?]

~ The time step for the simulation.

|

\\--// Sketch information - do not modify anything except names

V300 Do not put anything below this section - it will be ignored

\*View 1

\$192-192-192,0,Times New Roman|12||0-0-0|0-0-0|0-0-255|-1-1-1|-1-

1-1|72,72,5,0

11,1,0,392,341,6,8,34,131,0,0,1,0,0,0

10,2,Instalation of panels,392,360,66,11,40,131,0,0,-1,0,0,0

10,3,cumulated capacity simulated,542,335,40,20,3,3,0,0,0,0,0,0

10,4,Average timelife,807,452,48,18,8,131,0,0,0,0,0,0

1,5,1,3,4,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(450,341)|



12,6,48,792,342,10,8,0,3,0,0,-1,0,0,0  
 1,7,9,6,4,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(734,339)|  
 1,8,9,3,100,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(628,339)|  
 11,9,48,681,339,6,8,34,3,0,0,1,0,0,0  
 10,10,Depreciation of panels,681,360,57,13,40,131,0,0,-1,0,0,0  
 1,11,4,10,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(711,426)|  
 10,12,annual panels installed,128,307,42,13,8,131,0,0,0,0,0,0  
 1,13,12,1,1,0,0,0,64,0,-1-1-1,,1|(286,295)|  
 10,14,Percentage of maintenance and operation costs,202,611,62,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,15,Cost of installation of 1KW of a solar PV system USD,179,768,64,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,16,Cost of maintenance and operation of 1kw solar system,363,555,62,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,17,14,16,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(260,560)|  
 1,18,4,16,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(592,484)|  
 10,19,Conversor USD to €,366,755,40,14,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,20,Cost of installation of 1kw of a solar pv system €,374,664,73,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,21,15,20,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(248,704)|  
 1,22,19,20,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(381,721)|  
 1,23,20,16,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(407,603)|  
 10,24,Total cost of 1kw solar pv system,578,579,48,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,25,20,24,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(528,648)|  
 1,26,16,24,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(481,550)|  
 10,27,Efficiency of solar pv panels,1123,811,56,14,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,28,Solar irradiation,1263,830,42,14,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,29,Necessary area for 1kw solar pv system,1390,813,60,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,30,Performance ratio,1408,724,48,14,8,3,0,0,0,0,0,0  
 10,31,energy produced by 1kw solar pv system installed,1186,641,62,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,32,27,31,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1170,732)|  
 1,33,28,31,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1248,739)|  
 1,34,29,31,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1319,714)|  
 1,35,30,31,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1311,668)|  
 10,36,Energy produced by 1kw solar pv system in its life,1004,552,73,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,37,31,36,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1140,578)|  
 1,38,4,36,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(930,492)|  
 10,39,Average cost of electricity of a 1kw solar pv system,789,593,64,21,8,3,0,0,0,0,0,0  
 1,40,24,39,1,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(696,573)|

1,41,36,39,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(902,565)|  
 10,42,Annual production of energy,1021,399,52,21,8,3,0,0,0,0,0  
 1,43,3,42,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(793,296)|  
 1,44,31,42,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1170,508)|  
 10,45,Consumption of electricity,901,160,51,21,8,131,0,0,0,0,0  
 10,46,Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics  
 energy,1133,213,93,28,8,3,0,0,0,0,0  
 1,47,45,46,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(995,158)|  
 1,48,42,46,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1096,323)|  
 1,49,1,10,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(499,412)|  
 12,50,48,267,340,10,8,0,3,0,0,-1,0,0,0  
 1,51,1,50,100,0,0,22,0,0,0,-1-1-1,,1|(331,341)|  
 10,52,Cumulated capacity data,642,254,49,14,8,3,0,0,0,0,0  
 10,53,Time,392,385,21,8,8,2,1,3,-1,0,0,0,128-128-128,0-0-0,|12||128-  
 128-128  
 10,54,Time,332,408,21,8,8,2,0,3,-1,0,0,0,128-128-128,0-0-0,|12||128-  
 128-128  
 1,55,54,2,0,0,0,0,0,64,0,-1-1-1,,1|(354,389)|  
 10,56,Futuro consumo,1210,89,58,8,8,3,0,0,0,0,0  
 1,57,56,46,1,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1146,147)|  
 10,58,Time,1200,318,21,8,8,2,0,3,-1,0,0,0,128-128-128,0-0-0,|12||128-  
 128-128  
 1,59,58,46,0,0,0,0,0,64,0,-1-1-1,,1|(1176,281)|  
 10,60,FUTUROS paneles instalados,374,201,50,14,8,3,0,0,0,0,0  
 1,61,60,1,0,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(382,268)|  
 10,62,Consumo,985,28,32,8,8,3,0,0,0,0,0  
 1,63,45,62,0,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(942,93)|  
 1,64,56,62,0,0,0,0,0,128,0,-1-1-1,,1|(1104,60)|  
 10,65,Time,902,40,21,8,8,2,0,3,-1,0,0,0,128-128-128,0-0-0,|12||128-128-  
 128  
 1,66,65,62,0,0,0,0,0,64,0,-1-1-1,,1|(931,35)|  
 \\--// Sketch information - do not modify anything except names  
 V300 Do not put anything below this section - it will be ignored  
 \*View 2  
 \$192-192-192,0,Times New Roman|12||0-0-0|0-0-0|0-0-255|-1-1-1|-1-  
 1-1|72,72,100,0  
 12,1,25595244,260,-1044,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 Instalation of panels,Graph  
 12,2,25595248,607,-1047,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 cumulated capacity simulated,Graph  
 12,3,25595252,929,-1048,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
 Cost of maintenance and operation of 1kw solar system,Graph  
 12,4,25595256,257,-724,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0

Total cost of 1kw solar pv system,Graph  
12,5,25595260,605,-713,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
Average cost of electricity of a 1kw solar pv system,Graph  
12,6,25595264,927,-717,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics  
energy,Graph  
12,7,25595268,1250,-712,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
Consumption of electricity,Graph  
12,8,25595272,424,-344,339,210,3,188,0,0,2,0,0,0  
cumulated capacity simulated,Table  
12,9,25595280,590,89,508,200,3,188,0,0,1,0,0,0  
compare\_cumul  
12,10,25595284,342,454,262,147,3,188,0,0,2,0,0,0  
Instalation of panels,Graph  
12,11,25595288,786,451,150,150,3,44,0,0,1,0,0,0  
Consumo  
\\--// Sketch information - do not modify anything except names  
V300 Do not put anything below this section - it will be ignored  
\*View 3  
\$192-192-192,0,Times New Roman|12||0-0-0|0-0-0|0-0-255|-1-1-1|-1-1-1|72,72,100,0  
12,1,50348592,197,198,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
Instalation of panels,Graph  
12,2,50349284,533,200,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
cumulated capacity simulated,Graph  
12,3,50349288,874,199,150,150,3,44,0,0,2,0,0,0  
Annual production of energy,Graph  
12,4,50349292,665,535,249,150,3,188,0,0,2,0,0,0  
Percentage of electricity consumed produced by solar photovoltaics  
energy,Graph  
12,5,50349296,267,537,150,150,3,44,0,0,1,0,0,0  
Consumo\_frente\_a\_producción

# Anexo D: Causal Loop Diagram

