



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 de
los materiales utilizados en la energía solar
fotovoltaica mundial**

Autor:

Estremera Pedriza, Noelia

Tutor:

Miguel González, Luis Javier

**Departamento de Ingeniería de
Sistemas y Automática**

Valladolid, Julio 2016.





Por y para mi familia, sin ellos esto nunca habría sido posible, habéis estado animando en los buenos y malos momentos. GRACIAS.

También quiero agradecer a mis compañeros, amigos y profesores que han hecho que esto fuera realidad con su apoyo, ánimo y enseñanzas. Hicieron que quisiera ir a clase a aprender y disfrutar de todo esto.

Espero que este no sea el final, sino el comienzo de algo bueno.



Resumen

Se espera que, en los próximos años, la energía solar fotovoltaica sea capaz de generar gran parte del mix energético mundial. Se estima que de los 28 TW de potencia instalada acumulada, se logren cubrir entre 1 TW - 4 TW, lo que equivaldría al 5 % - 15 % de la necesidad eléctrica. Para este gran despliegue sería necesario: una apuesta por las energías renovables, bajada de costes e innovación de las células solares, pero sobre todo, se necesita materia prima para fabricarlos. Actualmente los paneles más conocidos son los de silicio, GaAs, CIGS y TeCd. Algunos de estos materiales carecen de reservas para llevar a cabo ese despliegue de potencial. El objetivo de este proyecto es analizar la disponibilidad de algunos materiales esenciales en el mundo para poder cubrir esos niveles de energía suministrada hasta el año 2050. Este análisis se desarrollará mediante un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas.

Palabras clave: Células solares, fotovoltaica, energía, futuro, mundo.

Abstract

In the next few years, it is expected for the Photovoltaic Solar Energy to be able to produce a big chunk of the world energy consumption. Of the 28TW of the world installed power capacity, Solar Energy is estimated to cover between 1TW to 4TW, which would be around 5% to 15 of that need. To achieve this massive deployment: An exercise in the use of renewable energies, the lowering of costs, and the innovation of the photovoltaic cells. But above all, what is most needed is the raw materials to build them. Nowadays, the most well-known panels are the silicon ones, GaAs, CIGS and TeCd. Some of them lack the reserves required to achieve the aforementioned technological rollout of potential. Therefore, the aim of this project is to ascertain whether there will be enough material reserves in the world to cover such levels of supplied energy until the year 2050. This analysis would be done through a simulation model based on System Dynamics.

Keywords: Solar Cells, photovoltaic, energy, future, world.



Contenido

1. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	11
2. ANTECEDENTES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....	13
2.1. Historia.....	13
2.2. Tipos de energías verdes o renovables.....	16
2.2.1. Energía Eólica.....	16
2.2.2. Energía Hidráulica.....	18
2.2.3. Biomasa.....	19
2.2.4. Diferencia de Temperatura Oceánica.....	20
2.2.5. Energía Maremotriz.....	21
2.2.6. Energía Geotérmica.....	21
2.2.7. Olas del Mar.....	23
2.2.8. Energía Solar.....	24
2.3. Desarrollo de las energías renovables.....	25
3. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	27
3.1. Estado del Arte e historia de la energía solar fotovoltaica a nivel mundial.....	27
3.2. Aplicaciones, ventajas e inconvenientes de la energía solar fotovoltaica.....	35
3.2.1. Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica.....	35
3.2.2. Ventajas de la Energía Fotovoltaica.....	35
3.2.3. Inconvenientes de la Energía Fotovoltaica.....	36
3.3. Sistemas fotovoltaicos.....	37
3.3.1. Sistema fotovoltaico aislado o autónomo.....	38
3.3.1.1. Módulo fotovoltaico.....	39
3.3.1.2. Regulador de carga de tensión.....	45
3.3.1.3. Banco de baterías o acumulador de energía.....	45

3.3.1.4. Inversor o adaptador de corriente.....	46
3.3.2. Sistemas fotovoltaico conectado a red.....	47
3.3.2.1. Módulos fotovoltaicos.....	47
3.3.2.2. Inversor.....	47
3.3.2.3. Dispositivo de intercambio con la red.....	47
3.3.2.4. Contador de energía.....	47
3.3.3. Tipos de paneles en función de la forma.....	47
3.3.4. Sistemas de seguimiento solar.....	47
3.4. El Sol y su energía.....	49
3.4.1. La radiación solar.....	49
3.4.2. Tipos de radiación solar.....	51
3.4.3. La irradiancia y la irradiación.....	53
3.4.4. Insolación.....	54
3.4.5. Conclusiones para orientar bien un panel solar.....	55
3.5. La célula fotovoltaica. El efecto fotoeléctrico y los semiconductores.....	56
3.5.1. El efecto fotoeléctrico y los semiconductores.....	56
3.5.2. Tipos de células y materiales de fabricación.....	60
3.5.2.1. Primera Generación de células fotovoltaicas.....	61
3.5.2.2. Segunda Generación de células fotovoltaicas.....	67
3.5.2.3. Tercera Generación de células fotovoltaicas.....	73
3.5.2.4. Cuarta Generación de células fotovoltaicas.....	81
3.5.2.5. Resumen de eficiencias en celdas fotovoltaicas en la actualidad.....	82
4. JUSTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES ELEGIDOS PARA EL MODELO.....	85
5. INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA DE SISTEMAS CON SOFTWARE VENSIM.....	89
5.1. La dinámica de sistemas.....	89



5.2. El software Vensim PLE.....	90
5.3. Etapas en el modelado con dinámica de sistemas.....	91
5.4. Modelado de los materiales FV con dinámica de sistemas.....	99
6. DIAGRAMA CAUSAL Y RELACIONES ENTRE LAS VARIABLES DEL MODELO.....	103
7. MODELOS.....	117
7.1. Modelo del Silicio.....	129
7.2. Modelo del Arsénico.....	132
7.3. Modelo del Galio.....	141
7.4. Modelo del Indio.....	155
7.5. Modelo del Selenio.....	165
7.6. Modelo del Cobre.....	175
7.7. Modelo del Teluro o Telurio.....	185
7.8. Modelo del Cadmio.....	195
7.9. Células FV – Relación entre materiales.....	204
8. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN – MODELO BASE.....	207
9. VALIDACIÓN DEL MODELO BASE.....	215
10. POSIBLES ESCENARIOS FUTUROS.....	219
10.1. Escenario Pesimista – Instalación FV acumulada de 1 TW en el año 2050.....	219
10.2. Escenario Optimista – Instalación FV acumulada de 4 TW en el año 2050.....	231
11. PROPUESTAS Y POLÍTICAS A DESARROLLAR.....	245
12. CONCLUSIÓN.....	249
13. VIABILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO.....	251
14. BIBLIOGRAFÍA.....	253
15. FUENTE IMAGENES.....	262



16. ANEXOS.....	265
16.1. Porcentajes de material en módulos FV.....	265
16.2. Costes de reciclaje de los materiales.....	266
16.3. Variable – Porcentaje incremento de instalación en los escenarios.....	267
16.4. Gastos energéticos de extracción y producción de los materiales.....	268
16.5. Porcentajes de material reciclado al año.....	272
16.6. Curiosidades sobre la energía fotovoltaica en el mundo.....	273

1. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La energía solar fotovoltaica se vislumbra por los expertos del IEA (International Energy Agency) como una de las energías limpias con más futuro debido a que es ilimitada y económica. Junto con la energía eólica se espera que en unos años sustituya la mala marcha de las energías fósiles puesto que son limitadas y se están agotando, mientras que la demanda de consumo de energía cada vez aumenta más. El problema de las energías es que la humanidad depende en gran medida de los materiales utilizados para obtener la energía consumida, y el agotamiento de estos materiales se ha visto disparado en las últimas décadas (aumento exponencial).

Desde ese año, 2010, el mundo ha instalado más potencia fotovoltaica que la que había sido capaz de acumular durante las cuatro décadas anteriores. Los nuevos sistemas que se han instalado en el año 2013 lo hicieron a un ritmo de cien megavatios por día (100 MW). El total acumulado superó los 150 gigavatios (GW) antes de finalizar el año 2014 y los mercados asiáticos, encabezados por China, han superado al mercado europeo, actualmente en desaceleración.

La electricidad de origen fotovoltaico puede llegar a suponer, según las previsiones de la AIE, hasta un 15% del total de la energía eléctrica que consumirá el mundo en el año 2050 (28 TW entre todas las energías renovables y no renovables). Para conseguir estos objetivos, la tecnología FV se enfrenta a una serie de obstáculos, económicos y de otras magnitudes, a los que deberá responder con propuestas tecnológicas, legislativas y reglamentarias. En los aspectos económicos, hay que tener en cuenta que en este tipo de energía, casi todos los gastos se hacen por adelantado, siendo muy importantes las subvenciones y la financiación en los primeros años. A eso hay que añadirle que hay una crisis económica global que está teniendo un gran impacto en estos temas. En cuanto a los aspectos políticos, el foco sigue estando en la necesidad de incrementar la competitividad y unas políticas de reducción de costes, con una gran incertidumbre y unos cambios regulatorios en Europa. Todo ello, con un escaso progreso en las políticas de cambio climático, aunque se vislumbra un cambio de tendencia porque la fotovoltaica, proporcionará energía limpia y contribuirá a reducir las emisiones mundiales de CO₂ a largo plazo, algo que preocupa mucho a la humanidad debido al calentamiento global.

Con todo, la energía solar fotovoltaica (FV) es una de las tecnologías de producción de energía eléctrica con más futuro en el mundo, Por ello el objetivo de este proyecto es estudiar, mediante el análisis de sistemas, la evolución de las reservas de los materiales implicados en la producción de módulos solares fotovoltaicos para dos escenarios futuros, uno en el que se llegue a cubrir un 5 % de la demanda eléctrica en el año 2050 (escenario pesimista) y otro en el que se consiga cubrir un 15 % (escenario optimista) en ese mismo año, sin que se agote la materia prima, porque aunque se recicle quizás no sea suficiente debido a las pocas reservas que tenemos en el mundo, pues para lograr esos objetivos las células solares FV se tienen que desarrollar a gran escala.



2. ANTECEDENTES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

2.1. HISTORIA

El hombre, a lo largo de su historia evolutiva ha realizado mediante su propio esfuerzo físico actividades que consumían energía, apoyándose además de los animales domésticos como los caballos o bueyes. Pero poco a poco se fueron apoyando en algo más que animales para realizar sus tareas. Ya en la Antigüedad, en Roma se hicieron experimentos y apareció una de las primeras fuentes de energía, el molino de agua. Aunque éste nunca llegó a desarrollarse tanto como para sustituir la energía del hombre.

Fue en Europa, en los siglos X y XI donde hubo grandes avances tecnológicos y así, la energía hidráulica se convirtió en el centro de la vida económica. A finales del siglo XI, Francia disponía de 20.000 molinos de agua (1 molino por cada 250 habitantes). Cada molino generaba de 2 a 3 *caballos de fuerza* y podía hacer el *trabajo de 10 a 20 personas* [1]. Este avance supuso un gran impacto económico para la sociedad.

Sin embargo, muchos pueblos y ciudades, como los del Norte de Europa, tuvieron que recurrir a la energía eólica pues en sus terrenos el agua escaseaba, era poco constante o no se podía acceder fácilmente a él. El viento era gratuito y había por todas partes con lo que se podían producir molinos eólicos en cualquier lugar.

Por aquella época, los molinos tanto de agua como de viento, se utilizaban para moler grano, accionar fuelles de fraguas o lavar, pero la tarea que los usaba por excelencia era la de abatanado (convertir lana en tejido). Un solo molino podía hacer el trabajo de toda una cuadrilla entera de abatanadores, con lo que éstos dejaron de trabajar la tierra para ponerse a criar ganado lanar.

Más importante aún que las fuentes de energía anteriores es su fuente de energía antecesora, la leña, gracias a la gran cantidad de bosques que hay en todo el mundo. En la edad media se comenzó a utilizar para fabricar carbón vegetal con el fin de obtener metales (mediante menas). Éste sería sustituido más adelante por el carbón mineral en el inicio de la revolución industrial.

Durante el primer tercio del siglo XIX (1825-1830) se dio paso a la era contemporánea, se realizaron una serie de avances entre los que destacó la aplicación práctica de la máquina de vapor, la primera herramienta que comenzó a utilizarse industrialmente y que no usaba fuerzas provenientes de animales.

A partir de la máquina de vapor se produjeron grandes cambios en la evolución tecnológica, económica y social.

Junto con la máquina de vapor, vinieron los motores de combustión interna, la utilización del gas para calefacción, el alumbrado, avances en la energía eléctrica y en medios de transporte (como la locomotora de George Stephenson quien utilizaba grandes cantidades de carbón). Aunque siempre hubo una lucha constante por mejorar el rendimiento de estas máquinas para poder aprovechar al máximo su energía.

Ésta sociedad que nació de la Revolución Industrial demandaba cada vez más energía. Así, la demanda del carbón comenzó a decaer y éste fue sustituido cada vez más por el petróleo y sus derivados, siendo el crecimiento del número de empresas petrolíferas proporcional a los nuevos mercados que se crearon. El primer campo petrolífero lo estableció Gran Bretaña en Irán en 1941.

Por todo ello, las empresas de Estados Unidos tuvieron mucho éxito en la segunda guerra mundial porque hubo grandes demandas de combustibles, en 1955 disponían de 2/3 del petróleo mundial. A la vez que Oriente Próximo se convertía en la mayor reserva de crudo del mundo.

Sin embargo, en 1973 comenzó la crisis del petróleo debido a la creciente demanda de energía en todo el mundo, más tarde en 1978 la crisis fue creciendo hasta que en 1980 el crudo se había revalorizado 19 veces en comparación con 1970. Los precios del petróleo y gas fueron creciendo hasta que se valoró la alternativa de volver a utilizar carbón otra vez, usado para las centrales eléctricas siendo este más barato para la industria. De esta forma, el carbón recuperó algo del mercado perdido con anterioridad.

Llegando a este punto, como se puede apreciar en la actualidad, la mayoría de actividades que se desarrollan utilizan fuentes de energía no renovables.

El origen de esa energía es el carbón, petróleo o fisión nuclear del uranio, los cuales precisan en su mayoría ser transformadas antes de ser consumidas. Son fuentes de energía no renovables porque no tienen posible sustitución una vez agotadas o, dicho de otro modo, el ciclo cronológico de formación es tan largo que no es posible su restauración, pues el carbón o el petróleo existen en cantidades limitadas y se consumen a un régimen mayor que el de su producción; estas materias necesitan miles de años para formarse, sin embargo al ritmo actual de consumo su agotamiento se estima en menos de 300 años.

Como resumen, se puede decir que en un principio aparecieron las energías renovables (energía eólica e hidráulica), después se empezó a usar el carbón para la máquina de vapor y otra maquinaria pero éste a su vez fue sustituido por el petróleo y gas natural, que al ser limitado y de costes muy elevados, esto produjo que se volviera a utilizar el carbón años después. Pero durante los últimos años debido a que las fuentes de energías fósiles (petróleo, gas y carbón) y energía

nuclear se pueden agotar en un futuro próximo, a su aumento de coste y problemas medioambientales, parece que se está produciendo el renacer de las energías renovables. Estas energías son mucho más respetuosas con el medioambiente y más baratas.

Respecto a la energía solar fotovoltaica que es la energía renovable que nos atañe, es muy similar en características a la energía eólica e hidráulica, tiene sus orígenes en el siglo XIX aunque no es hasta los años 50 del siglo XX cuando empieza a evolucionar. Hoy en día está alcanzando un periodo de madurez que le permite tener cierto desarrollo industrial comenzando por las células de silicio hasta llegar a utilizar la nanotecnología. Según las estimaciones de los expertos en el sector, su previsión es que tendrá un gran futuro en cuanto venza algunos de los obstáculos que tiene, como son temas relacionados con la normativa, financiación, subvenciones pero sobre todo costes de producción y eficiencias energéticas.

Un punto que es importante en la actualidad y que está relacionado con las energías renovables, es el de la sostenibilidad del planeta.

Para reducir la contaminación en la que se ve inmersa la tierra es preciso utilizar energías verdes o renovables pues como indica el primer principio de la termodinámica, la energía ni se crea ni se destruye, por ello la utilización por ejemplo de la energía del sol para producir electricidad, no produce cambios en el equilibrio de la tierra, al contrario de lo que pasa con las energías fósiles.

La idea de conseguir un desarrollo sostenible, analizado desde una visión energética, pasa por el uso de las energías renovables, es decir, aprovechar el sol que llega al planeta, lo cual no potenciará el efecto invernadero ni acelerará el cambio climático, no se emitirán sustancias contaminantes a la atmósfera, y no existirá recalentamiento del planeta.

Por todo ello, que hayan renacido las energías renovables y se estime un gran desarrollo actual y futuro para ellas es algo muy bueno.

A continuación veremos los tipos de energías renovables y veremos como en todas ellas, el Sol es un factor determinante en ellas:



Tipos de Energías Renovables y No Renovables. Fuente Imagen [1]

2.2. TIPOS DE ENERGÍAS VERDES O RENOVABLES (Fuente [22])

Podemos definir la “energía renovable” como la energía que se obtiene de fuentes naturales e inagotables, ya sea porque contienen una inmensa cantidad de energía o porque mediante medios naturales son capaces de regenerarse. No producen gases efecto invernadero ni dañan el medio ambiente (no producen emisiones de CO₂), debido a esto, a veces se las llama “energías verdes”.

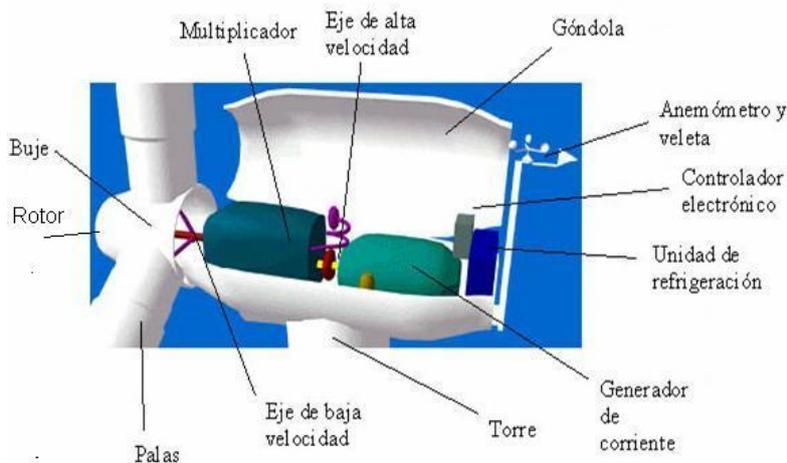
Además de los muchos beneficios que tienen estas energías, que se detallarán más adelante, tienen otros que son importantes como que contribuyen a disminuir la dependencia de los países de los suministros externos, favorecen el desarrollo tecnológico y la creación de empleo.

Existen varios tipos de esta energía, las cuales se comentan a continuación. Como veremos, en todas el Sol juega un papel fundamental.

2.2.1. Energía Eólica

El origen del viento proviene de las diferencias de presión que son provocadas en la Tierra por el Sol que la calienta y también a las irregularidades de la superficie terrestre.

El aerogenerador o generador eólico, es el dispositivo que se utiliza para realizar la conversión de la fuerza del viento en electricidad. Éste consiste en un sistema mecánico de rotación que posee palas (como los molinos de viento antiguos) y de un generador eléctrico con el eje solidario al sistema motriz, así el aire hará rotar las palas y al mismo tiempo el generador eléctrico. Fuente: <http://opex-energy.com/eolica>



Molino Eólico y Partes de un Generador. Fuente Imagen [2]

Uso de la energía eólica:

- Bombeo de agua.
- Transporte (veleros)
- Generación eléctrica y electrificación rural.
- Demandas de pequeña potencia.
- Pueden agruparse y formar parques eólicos conectados a la red eléctrica.

Se pueden utilizar acumuladores de energía en las instalaciones aisladas a la red de distribución eléctrica en periodos que no haya viento.

Ventajas:

- Gracias a las mejoras técnicas, en la actualidad, es una de las energías más competitivas y se estima un gran crecimiento del mercado en los próximos años.
- Evita la importación de carbón, petróleo y materiales radiactivos.
- Evita grandes impactos ambientales como la lluvia ácida y el efecto invernadero.
- Es barata y no produce residuos.
- La tecnología necesaria para instalarla es sencilla.
- Los espacios ocupados pueden permitir la actividad agrícola.

Inconvenientes:

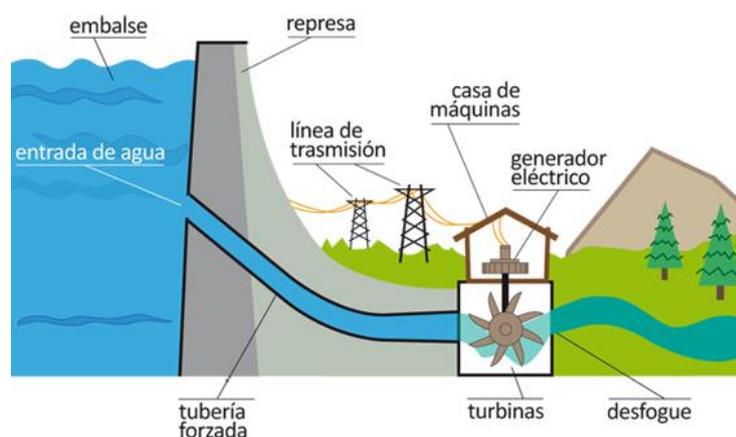
- Repercute sobre la fauna y flora.
- Impacto visual.
- Ruido.
- Interferencias en los medios de comunicación.

2.2.2. Energía hidráulica

Tiene su origen en el ciclo del agua, relacionado con el Sol, debido al calor que produce evapora el agua de los mares, lagos y ríos. Esa agua cae en forma de lluvia y nieve sobre la tierra para regresar al mar donde el ciclo se reinicia, es un ciclo de realimentación.

La energía hidráulica se obtiene a partir de la energía potencial asociada a los saltos de agua debido a la diferencia de alturas entre dos puntos del curso de un río o lago.

Las centrales hidroeléctricas, transforman el movimiento de las turbinas que genera el agua al pasar sobre ellas (puede ser agua natural o artificial) entre dos puntos de diferente altura, en energía eléctrica.



Central hidroeléctrica. Fuente Imagen [3]

En función de su tamaño, se pueden distinguir diferentes centrales hidroeléctricas:

- Grandes centrales de más de 10 MW de potencia que vierten la energía eléctrica a la red.

- Centrales minihidráulicas o minicentrales de menos de 10 MW de potencia.
- Centrales microhidráulicas de muy pequeña potencia (varios kW) y generalmente no conectadas a la red eléctrica.

Ventajas:

- No contamina.
- Es muy abundante.

Inconvenientes:

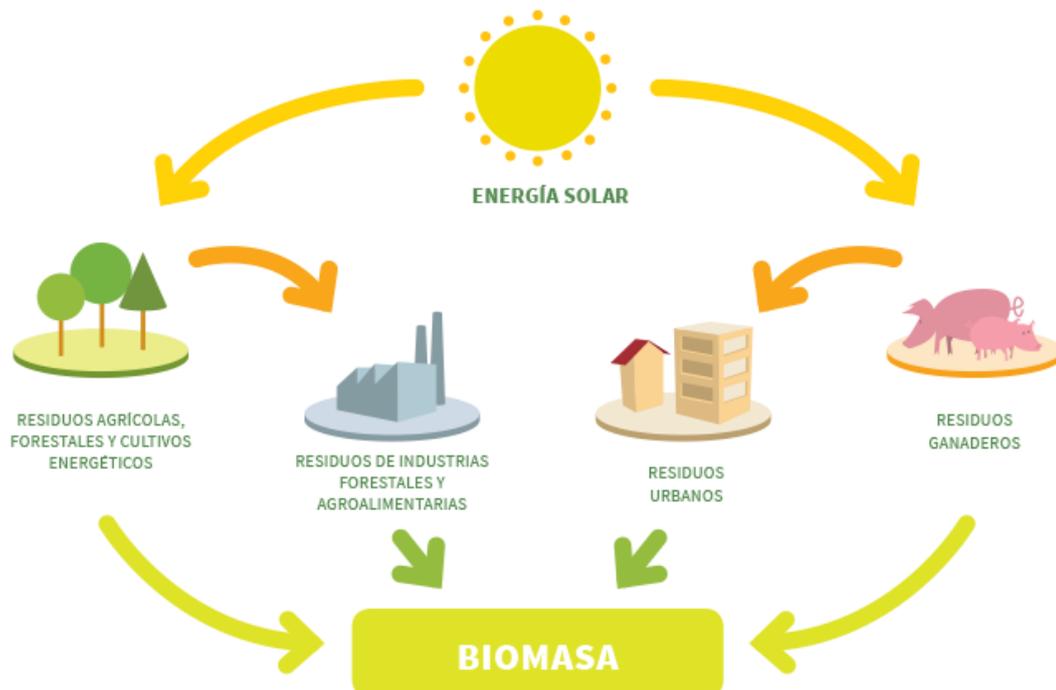
- Sus infraestructuras son muy caras.
- Depende de los factores climatológicos.
- Impacto medioambiental.



Fuente Imagen [4]

2.2.3. Biomasa

La biomasa es la utilización de la materia orgánica como fuente energética. Por su amplia definición, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracterizan por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza.



Biomasa. Fuente Imagen [5]

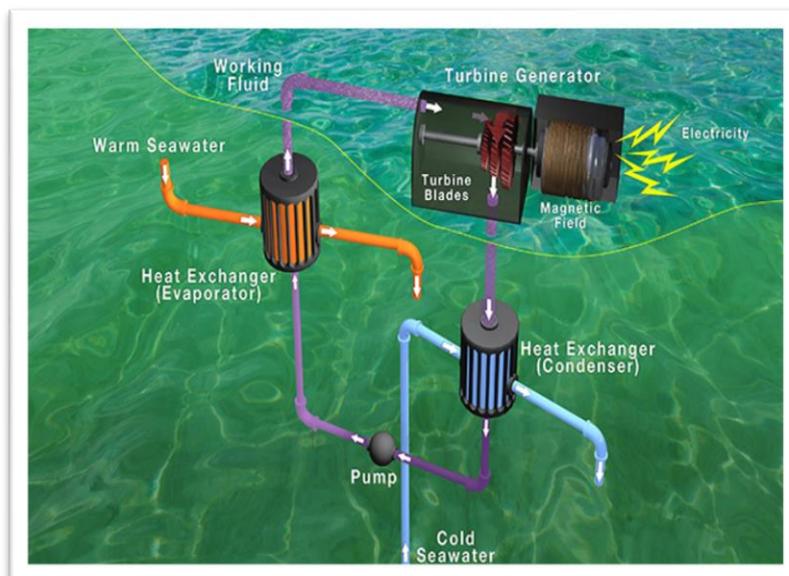
Como se puede ver en la imagen, este conjunto de materias puede provenir de residuos agrícolas, forestales, residuos de las industrias, residuos urbanos, residuos ganaderos, incluso de las aguas residuales y los lodos de depuradora.

Es la energía renovable con mayor potencial, ya que la fotosíntesis debida al sol en las plantas, permite convertir la energía solar en materia orgánica de la que se obtienen combustibles.

Combustibles	
A partir de:	Se obtiene:
Aceites	Sustitutos del diésel.
Alcoholes	Sustitutos de la gasolina
Plantas de digestión de residuos	Biogás
Madera	Combustible para calefacción

La valoración de la biomasa puede hacerse a través de cuatro procesos básicos mediante los que puede transformarse en calor y electricidad: combustión, digestión anaerobia, gasificación y pirolisis.

2.2.4. Diferencia de Temperatura Oceánica (OTEC):



OTEC.
Fuente Imagen [6]

Se utiliza la diferencia de temperatura que existe entre la superficie del océano, unos 20°C o más en las zonas tropicales, y la correspondiente a unas decenas de

metros debajo de la superficie, cercana a 0°C, para proporcionar los flujos de calor que impulsan un ciclo termodinámico y pueden producir otras formas de energía.

2.2.5. Energía Maremotriz (de las Mareas):



E. Mareas. Fuentes Imagen [7]

En lugares costeros donde se dan mareas muy altas o muy bajas, se ha propuesto construir grandes represas costeras que permitan generar energía eléctrica mediante grandes volúmenes de agua (aunque sean pequeñas las diferencias de altura). En cierto modo es similar a la energía hidráulica, sólo que su origen es la atracción gravitacional del Sol y de la Luna principalmente.

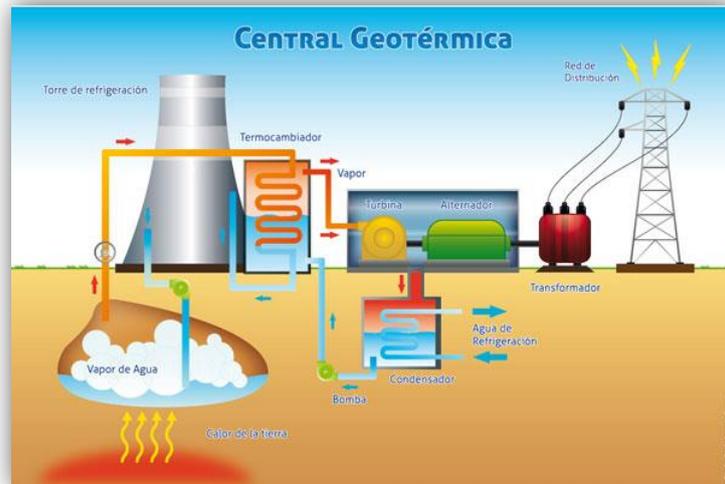
2.2.6. Energía Geotérmica

Es la energía que surge de la Tierra, la cual se encuentra en forma de calor como resultado de la desintegración de elementos radiactivos o del calor permanente que se originó al formarse el planeta, éste calor que sale a la superficie por medio de volcanes, géiseres, o aguas termales se recoge y se transforma en energía eléctrica.



Géiseres. Fuente Imagen [8]

Este efecto es aprovechado para fines térmicos en sistemas basados en bomba de calor, captando la energía mediante una red de tubos enterrados en el plano horizontal, o bien mediante una captación en vertical a profundidades mayores. Así, la conversión de la energía geotérmica en electricidad consiste en la utilización de vapor, que pasa a través de una turbina conectada a un generador que produce la electricidad. Su principal problema es la corrosión de las tuberías que transportan el agua caliente.



Central geotérmica. Fuente Imagen [9]

Uno de los lugares más reconocidos por su gran actividad geotermal es el llamado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, una zona de 40.000 kilómetros en forma de arco que corona al océano Pacífico.

Usos de la Energía Geotérmica:

- Balnearios: aguas termales que tienen aplicaciones para la salud.
- Calefacción y agua caliente.
- Electricidad.
- Extracción de minerales: se obtienen de los manantiales de azufre, sal común, amoníaco, metano y ácido sulfhídrico.
- Agricultura y acuicultura: para invernaderos y criaderos de peces.

Ventajas:

- No existen variaciones de temperatura importantes en el foco de captación de energía.

- Los residuos que produce son mínimos y de poco impacto ambiental.

Inconvenientes:

- Emisión de ácido sulfhídrico que en grandes cantidades puede ser letal.
- Emisión de CO₂ que aumenta el efecto invernadero.
- Contaminación de aguas próximas.
- Contaminación térmica.
- Deterioro del paisaje.
- No se puede transportar.

2.2.7. Olas del Mar

Una de las energías renovables que actualmente está en desarrollo es la energía de las olas (que aprovecha el vaivén de las olas del mar para generar energía eléctrica) y las corrientes marinas.

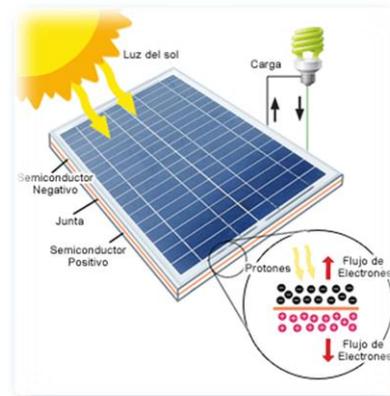


Fuente Imagen [10]

La tecnología para este fin usa sistemas de boyas que flotan en el mar o depósitos colocados en la costa que reciben de forma periódica las olas impulsando la fuerza a una turbina. Así, aprovechan el movimiento para producir electricidad.

Las olas son, a su vez, producidas por el efecto del viento sobre el agua. Por tanto, también es una forma derivada de la energía solar pues el viento se debe a ésta.

2.2.8. Energía solar



Paneles fotovoltaicos. Fuente Imagen [11]

La Energía solar es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el sol. La radiación solar que alcanza la Tierra puede aprovecharse por medio del calor que produce (energía solar térmica), como también a través de la absorción de la radiación (energía solar fotovoltaica), por ejemplo con paneles solares fotovoltaicos o con dispositivos ópticos.

Existen distintos tipos de tecnologías que permiten utilizar la energía proveniente del sol, los cuales se nombran a continuación:

- **Energía solar Directa o Pasiva:** Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como la luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. Otra aplicación directa, es el secado de ropa. Es decir, aprovecha el calor del sol sin necesidad de mecanismos o sistemas mecánicos.

-**Energía solar térmica:** aprovecha la energía calórica del sol para calentar algún tipo de fluido a baja temperatura, normalmente agua, para uso sanitario y calefacción, los sistemas utilizados para esto se denominan colectores solares.

-**Energía solar termoeléctrica:** Al igual que la anterior, aprovecha la energía calórica para producir electricidad, esto se logra a través de un ciclo termodinámico convencional, mediante el cual se calienta algún tipo de fluido a alta temperatura (aceite térmico).

-**Energía solar híbrida:** consiste en utilizar además de la energía solar, otro tipo de energía. Esto se conoce como hibridación. Un ejemplo de ella sería la energía eólico-solar, que consiste en utilizar aire calentado por el sol para hacer girar unos generadores ubicados en la parte superior de una chimenea.

- **Energía Solar Fotovoltaica:** Se llama fotovoltaica a la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial

eléctrico, sin que tenga lugar un efecto térmico. Este proyecto en concreto se centra en este tipo de aprovechamiento de la energía solar.

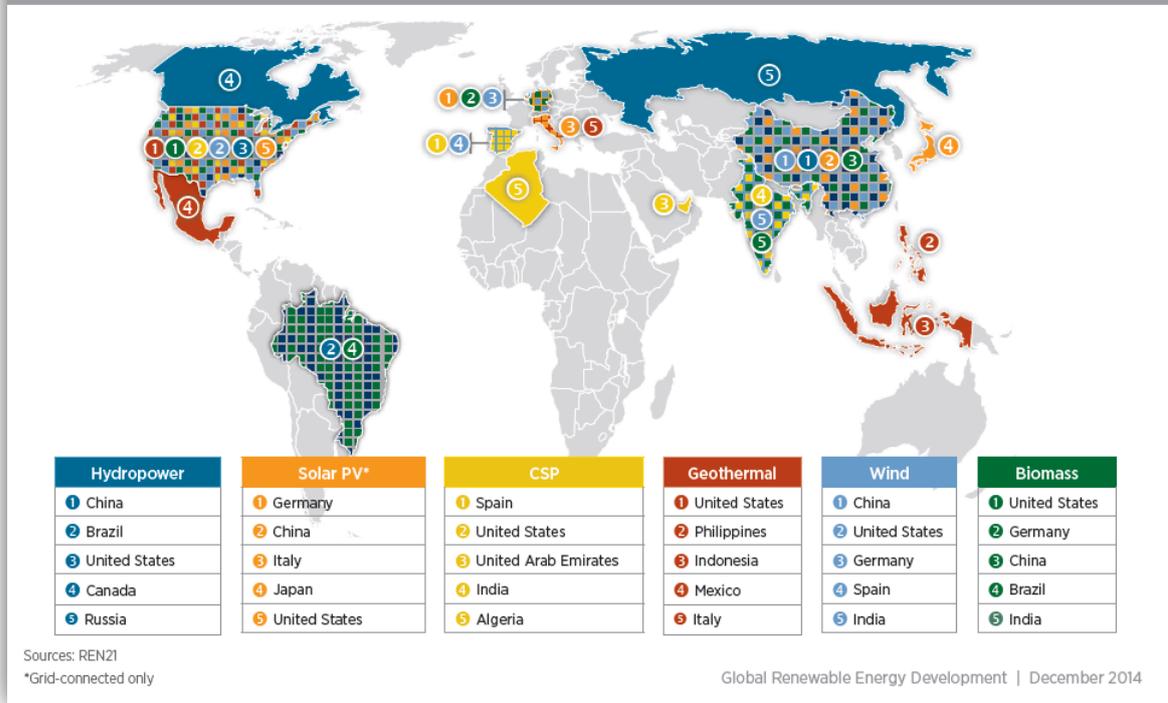
2.3 DESARROLLO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Como se ha podido observar, las energías renovables cada vez tienen más cerca un futuro esperanzador y prometedor dentro del mercado eléctrico.

A continuación se exponen una serie de datos para contemplar el gran desarrollo de estas energías en los últimos años, así como su importancia a nivel mundial [28]:

- La capacidad instalada acumulada en el mundo de la electricidad mediante fuentes renovables creció un 108% entre los años 2000 y 2013, pasó de tener datos de 748 GW a 1.560 GW [28]. Existe una gran demanda de electricidad y por ello, de energía.
- La energía eólica y la energía solar han sido las tecnologías renovables que más han crecido en todo el mundo y de forma muy rápida en los últimos años. La generación de electricidad eólica creció en un factor de 18 y la generación de electricidad solar creció en un factor de 68 entre 2000 y 2013.
- Dentro de la energía solar, la energía solar fotovoltaica (PV) y la energía solar concentrada (CSP) se encuentran entre las tecnologías que más rápido ha sido su crecimiento en el mundo.
- En el año 2013, China era la que más capacidad instalada acumulada de electricidad poseía, lo mismo ocurría con la energía eólica e hidráulica. Sin embargo Alemania lideró en el mundo con su gran capacidad instalada acumulada de energía fotovoltaica. Estados Unidos fue líder en las energías relacionadas con la biomasa y energía geotérmica. La distribución mundial de energías renovables podemos verla en la siguiente imagen:

Top Countries with Installed Renewable Electricity by Technology (2013)



Principales países con electricidad renovable instalada de Tecnología (2013)

Fuente Imagen [12]

3. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

3.1. ESTADO DEL ARTE Y BREVE HISTORIA DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA A NIVEL MUNDIAL

Del inicio a la primera célula de Silicio (Fuente [31]):

Año 1839 → El punto de partida se considera que fue Alexandre Edmond Bequerel (París 1820 – París 1891), físico francés que descubrió el efecto fotovoltaico cuando sólo tenía 19 años. Este estaba experimentando con una pila electrolítica con electrodos de platino, cuando comprobó que la corriente subía en uno de los electrodos al exponerlo al sol.

Año 1873 → Willoughby Smith descubre el efecto fotovoltaico en sólidos, concretamente en el selenio.

Año 1877 → El inglés William Grylls Adams profesor de Filosofía Natural en la King College de Londres, junto con su alumno Richard Evans Day, produjeron la primera célula fotovoltaica de selenio.

Año 1904 → Albert Einstein publica su artículo sobre el efecto fotovoltaico, al mismo tiempo que un artículo sobre la teoría de la relatividad.

Año 1921 → Einstein gana el premio Nobel de 1921 por sus teorías de 1904 explicando el efecto fotovoltaico (“for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect”).

Año 1954 → La posibilidad de una aplicación práctica del fenómeno no llegó hasta 1953 cuando Gerald Pearson de Bell Laboratories, mientras experimentaba con las aplicaciones en la electrónica del silicio, fabricó casi accidentalmente una célula fotovoltaica basada en este material que resultaba mucho más eficiente que cualquiera hecha de selenio. A partir de este descubrimiento, otros investigadores científicos también de laboratorios Bell, Daryl Chaplin y Calvin Fuller perfeccionaron este invento y produjeron células solares de silicio capaces de proporcionar suficiente energía eléctrica como para que pudiesen obtener aplicaciones prácticas de ellas. De esta manera empezaba la carrera de las placas fotovoltaicas como proveedoras de energía.

En el año 1954, éstos publicaron el artículo “A New Silicon p-n junction Photocell for converting Solar Radiation into Electrical Power”, donde explican los resultados del descubrimiento de las células solares de silicio con una eficiencia del 4,5%.

De la primera célula de Silicio a las aplicaciones industriales y espaciales:

Año 1955 → Se empiezan a aplicar elementos solares fotovoltaicos a la industria aeroespacial americana.

Año 1958 → Se lanza el Vanguard I, el primer satélite alimentado con energía solar fotovoltaica. También ese mismo año se lanzan los satélites Explorer III, Vanguard II y Sputnik-3: todos ellos alimentados con este tipo de energía.

Año 1959 → Hoffman Electronic alcanza un rendimiento de 10% en sus células comerciales.

Año 1960 → Se consiguen células fotovoltaicas que alcanzan una eficiencia del 14%.

Año 1962 → Se lanza el satélite Telstar, que fue el primer satélite comercial de telecomunicaciones. Tenía una potencia fotovoltaica de 14 W.

Año 1963 → La empresa Sharp consigue una forma práctica de producir módulos de silicio. En Japón se instala un faro de 242 MW.

Año 1964 → Se lanza la nave espacial Nimbus (con 470 W).

Año 1973 → Debido a la crisis del petróleo, comienza el interés por las energías renovables y se empiezan a utilizar los paneles solares de forma comercial en aplicaciones terrestres.

Para estas aplicaciones se tuvo que reducir el precio de los módulos a la mitad, por lo que se empezó a utilizar silicio de rechazo de la industria electrónica de semiconductores.

La Universidad de Delaware construye “Solar One”, una de las primeras viviendas con energía solar fotovoltaica.

Años 1974-77 → Se fundan las primeras compañías de energía solar. En 1977 se alcanza una producción mundial de paneles solares fotovoltaicos de 500 KW.

Año 1981 → Vuela el “Solar Challenger”, un avión no tripulado abastecido con energía solar fotovoltaica.

Año 1983 → La producción mundial de energía solar fotovoltaica supera los 21,3 MW, y las ventas superan los 250 millones de dólares. El Solar Trek, un vehículo alimentado por energía solar fotovoltaica (1 kW) atraviesa Australia: 4000 km en 20 días. Y se construye una planta de energía solar fotovoltaica de 6 MW en California, en una extensión de 120 acres.

Año 1992 → Se instala un sistema fotovoltaico de 1,5 kW en Lago Hoare, Antártida, con baterías de 2,4 kWh. Se utiliza para abastecer el equipamiento de un laboratorio, iluminación, PCs e impresoras y un pequeño horno microondas.

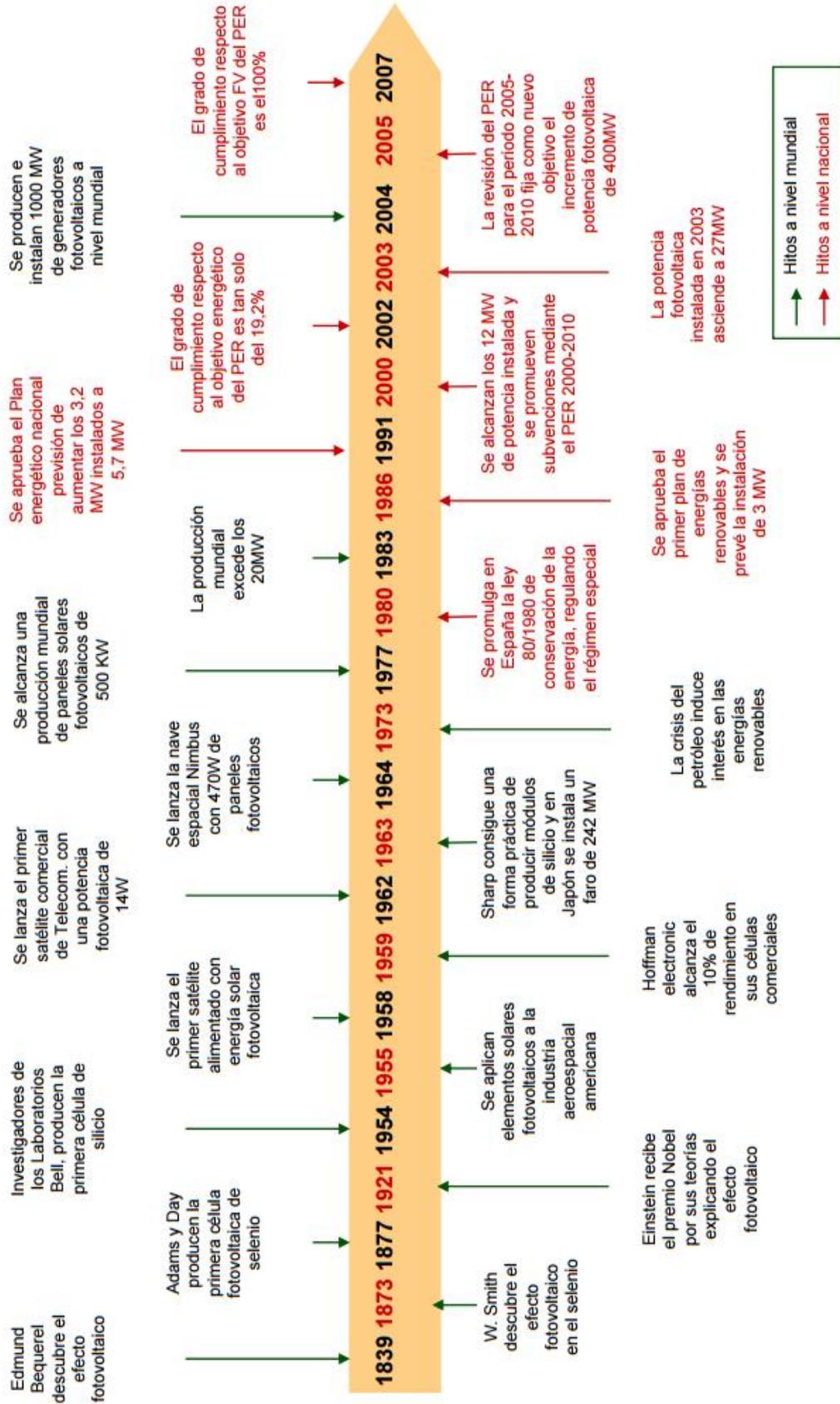
Año 1996 → El “Ícaro”, un avión no tripulado movido por energía solar fotovoltaica, sobrevuela Alemania. Las alas y la zona de cola están recubiertas de 3000 células supereficientes con una superficie de 21 m² (*Fuente: pvpower.com*).

Año 2004 → Se producen e instalan 1000 MW de generadores fotovoltaicos a nivel mundial.

En la siguiente imagen [31], se puede ver un resumen de lo ocurrido hasta el año 2007, hitos mundiales y algunos a nivel nacional (España):



Historia de la energía solar fotovoltaica.



A partir del año 2007 → Año tras año, las células han ido evolucionando en su tecnología y con distintos materiales para aumentar el rendimiento, durante estos años aparecieron nuevas células que se explicaran más adelante en este proyecto.

Así, la energía solar fotovoltaica ha ido adquiriendo una mayor importancia en la generación de energía eléctrica. Por ello, cada vez son más los países que se introducen en este tipo de energía. Además, en comparación con otras energías renovables (por ejemplo la eólica) y sus recursos, la radiación solar es el recurso energético renovable mejor repartido por todo el mundo.

Año 2012 → Se llegó a los 102 GW de energía acumulada instalada en el mundo.

Año 2013 → Los fabricantes de estados unidos tienen un 2% de participación en el mercado mundial fotovoltaico, sin embargo Asia y China figuran como líderes mundiales con un 86% de la producción de módulos.

De los países Europeos, con un 9% de participación, los países más importantes a nivel mundial son Alemania y España debido a que son sitios con mayor porcentaje de sol al año.

Además de los países anteriormente citados, también hay que mencionar los más de 100 países donde, en cuanto a producción la energía solar fotovoltaica ha sido la más desarrollada y la capacidad fotovoltaica conectada a la red ha aumentado un 60% como tasa promedio anual.

Respecto a las tecnologías, las células de silicio policristalino siguen siendo las más utilizadas a nivel mundial, seguidas por las de silicio monocristalino. Aun así, uno de los principales obstáculos para el desarrollo de esta energía es el coste de la electricidad solar. Como se puede ver, el silicio se mantiene como la materia prima básica para la industria FV. Es el segundo elemento más abundante del planeta y, sin embargo, el mercado de extracción y refinado de este elemento se enfrenta a un problema de escasez y a elevados costes de procesado.

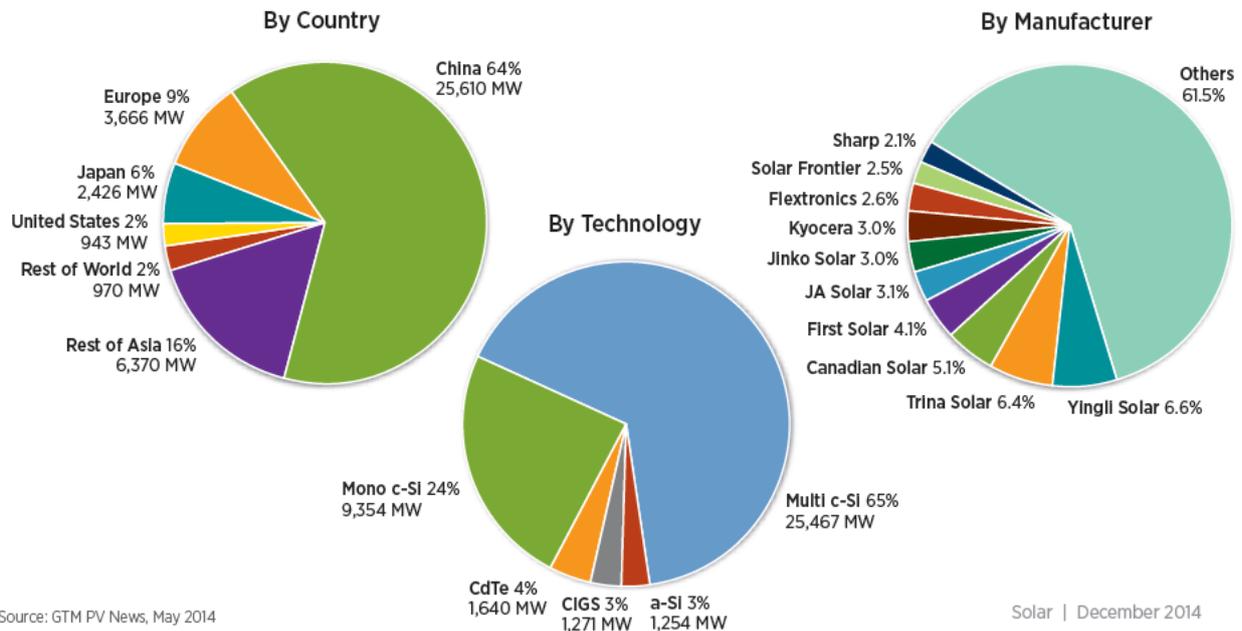
Referido a las empresas productoras de módulos, 7 de las 10 empresas productoras más importantes son las chinas. Las principales productoras son: Yingli Green Energy, Trina Solar, Canadian Solar y First Solar.

En este año, aproximadamente el 39% (1.874 MW), de la energía solar fotovoltaica instalada fue conectada a la red distribuida (*Fuente: Larry Sherwood / IREC*).

**Fuente: SEIA 2014*

Todos estos datos se pueden comprobar en la siguiente imagen:

Global Solar Module Production, 2013: 39,985 MW



WORLDWIDE PHOTOVOLTAIC MANUFACTURING (2013)

Fuente: [28] - 2013 Renewable Energy Data Book

Año 2014 → Llegados a este punto, es cuando al echar la vista a atrás se puede decir que los costes de la fotovoltaica han caído un 80% en los últimos 5 años, así lo expone el informe 'Rethinking Energy' presentado por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA).

Hay muchos factores que han influido en este cambio, uno de ellos es que las tecnologías que se utilizan hoy en día son más eficientes capaces de generar energía incluso en condiciones poco óptimas, otro factor es que las energías de almacenamiento de la energía están mejorando rápidamente, así como las políticas energéticas que han impulsado la UE, Estados Unidos y China, que han hecho posible la disminución de precios de todas las energías, también ha tenido mucho que ver el fracking (técnica para extraer gas natural de yacimientos no convencionales) en la caída de los precios de los hidrocarburos y de las energías renovables en particular.

Según el estudio el precio de las placas solares fotovoltaicas [3] ha descendido entre un 65% y un 75% entre 2009 y 2013, y el precio de la energía lo ha hecho un 80% desde 2008, con una tendencia a la baja en los próximos años impresionante, se puede ver la previsión hasta el año 2020 en el siguiente gráfico:



Fuente Imagen [13]

Una consecuencia de esto, es que al disminuir los precios, crecen los mercados y la demanda y el consumo aumentan, generando otras necesidades, así como oportunidades de investigación, desarrollo e innovación que atraen a nuevas empresas para invertir más dinero y que haya más competidores. La inversión mundial en la energía fotovoltaica ha crecido exponencialmente en los últimos 10 años, superando los 140.000 millones de euros.

En los últimos años se ha podido comprobar que la energía renovable tiene un efecto dominó positivo, tanto para la sociedad como para las actividades económicas y ambientales. Según el informe de IRENA, un estudio japonés explica que los beneficios de las energías renovables son entre 2 y 3 veces mayores que los que implican los costes.

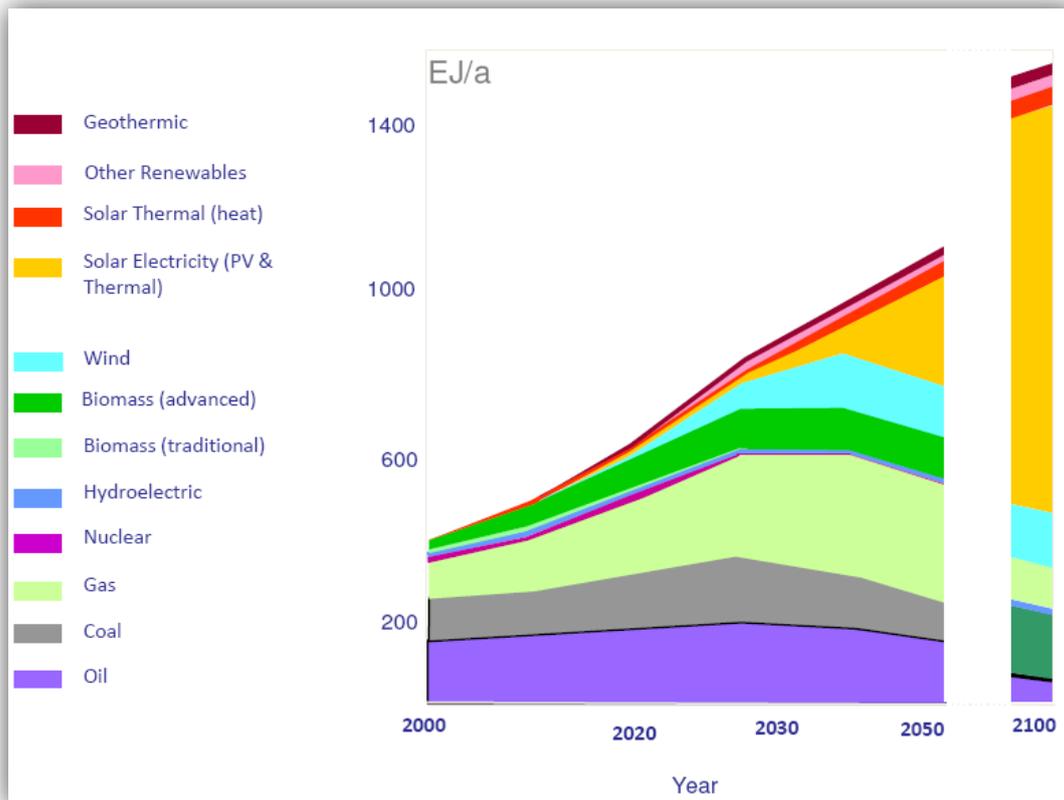
Además en estos años, con la energía solar fotovoltaica se han creado muchos puestos de empleo, sólo esta energía en el año 2014 creó 2.494,6 puestos de trabajo directos e indirectos de los 7.673,7 puestos que originaron todas las energías renovables juntas, fue la mayor de todas.

Esta energía, ha ofrecido una hoja de ruta para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, una de las principales causas del calentamiento global.

Por todas estas razones, podemos afirmar que en pocos años las energías renovables tendrán una influencia mayor a la que tienen ahora en cuanto a producción de energía se refiere. No es extraño que la energía fotovoltaica, se

vislumbre como una de las energías renovables que más va a crecer en un futuro pues es una de las fuentes de energía renovable más fiable. [*] Datos obtenidos del documento de plan de energías renovables 2011-2020 de la IDAE.

Una de esas previsiones es la más citada en la actualidad, elaborada por el German Advisory Council on Global Change, en el año 2003:



Fuente [27] – Informe de Vigilancia tecnológica

Previsiones de aplicación–expansión de las energías renovables, período 2000 - 2100. Fuente: Scientific Advisory Board to the German Government on Global Change (2003).

En la imagen se puede visualizar el gran crecimiento estimado hasta el año 2100 para la energía solar fotovoltaica y termoeléctrica, en este caso concreto las dos juntas (aunque este proyecto trate solamente de la fotovoltaica), pero posiblemente sea la energía que más crezca en un futuro.

3.2. APLICACIONES, VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA (Fuente [22])

3.2.1. Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica

- Instalaciones que alimentan sistemas alejados de la red de distribución, como la electrificación de edificaciones aisladas: pequeños electrodomésticos, pequeños consumos no destinados a calentamientos, en casas rurales y hospitales. También el alumbrado público aislado: aparcamientos, farolas, áreas de descanso, parquímetros, etc.
- Pequeñas redes de distribución, próximas a los puntos de consumo.
- También se aplica a los sistemas fotovoltaicos que suministran energía eléctrica a la red de distribución.
- Electrificación de sistemas de bombas de agua, repetidores de TV, radio y telefonía, etc.
- Balizado y señalización: marítimos (también sistemas de carga para los acumuladores de los barcos), señalización ferroviaria, antenas, sistemas de comunicaciones de emergencia (postes SOS carreteras), sistemas de vigilancia de datos ambientales y de calidad del agua.
- Conexión a red eléctrica de centrales eléctricas pequeñas, que permiten disminuir las pérdidas en la red, actualmente esta aplicación de la energía es la que está generando mayor desarrollo, ya que se vende a la red con un precio muy asequible.
- Fuente de energía para naves y satélites espaciales.
- Recarga de vehículos eléctricos.

3.2.2. Ventajas de la Energía Fotovoltaica

- No daña la flora ni la fauna (el medio ambiente).
- No emite gases perjudiciales como los gases de efecto invernadero (por ejemplo CO₂).
- No expulsa residuos peligrosos.
- Contribuye a lograr la sostenibilidad futura.

- Lo paneles son silenciosos y limpios.
- El combustible (el Sol) es gratis e inagotable en todas las partes del mundo.
- Hace que se dependa menos de los suministros de electricidad externos.
- Se pueden instalar tanto en zonas urbanas como en zonas rurales o aisladas.
- La temperatura de operación es la temperatura ambiente.
- Se puede complementar con otras fuentes de energía renovable.
- Su instalación es modular, simple y rápida de realizar debido a su proceso de instalación.
- Se puede instalar en estructuras existentes como tejados de las casas, garajes, aviones etc.
- No tiene piezas móviles que tengan que ser sustituidas por el desgaste, con lo que evita costes de mantenimiento y transporte.
- Los paneles tienen una vida útil larga (más de 20 años con plena eficacia), lo cual económicamente es bueno, salen rentables.
- Es una de las tecnologías renovables más aceptada por la sociedad.
- Gracias a los avances tecnológicos, cada vez es más económica su instalación (al contrario de los combustibles fósiles que aumentan sus costes al acabarse).
- Una vez que se ha finalizado su explotación, prácticamente no deja huella alguna ni restos.
- Los costos de transporte son muy bajos.

3.2.3. Inconvenientes de la Energía Fotovoltaica

- El Sol ilumina toda la Tierra, pero de forma desigual, no se puede aprovechar en todos los sitios de la misma forma (limitaciones geográficas). En este sentido, claramente se ven desfavorecidos los países nórdicos respecto a los próximos al Ecuador, donde hay más horas de Sol al día.
- Carácter incontrolable y variable en el tiempo de la intensidad de radiación solar.

- Este punto anterior también se debe a limitaciones técnicas relacionadas con el rendimiento obtenido. El rendimiento de las células, aunque en la actualidad se está aumentando cada vez más y depende del tipo de célula, suele estar entre el 15% - 20% de la energía lumínica que reciben.
- El almacenamiento de la energía, en ocasiones puede ser poco fiable.
- Almacenamiento poco económico.
- La elevada inversión inicial es un condicionante económico-financiero.
- Largo periodo de amortización de la instalación (entre 5 y 7 años actualmente).
- Los paneles solares tienen un ciclo de vida muy alto (entre los 20-30 años normalmente), este dato perjudica la obsolescencia programada de la industria en este sector, esto es lo que hace que la inversión inicial tenga que ser alta.
- Falta de espacios en algunos casos, ya que para recoger mucha energía hace falta una gran extensión de terreno.
- El propietario corre a cargo del mantenimiento y las averías que puedan suceder.
- Los módulos de los paneles llegan a alcanzar altas temperaturas, lo que puede ocasionar peligro en determinados lugares, como instalaciones que estén cerca de los bosques.
- Limitaciones respecto al consumo, no se puede utilizar más energía de la acumulada en períodos donde no haya sol.

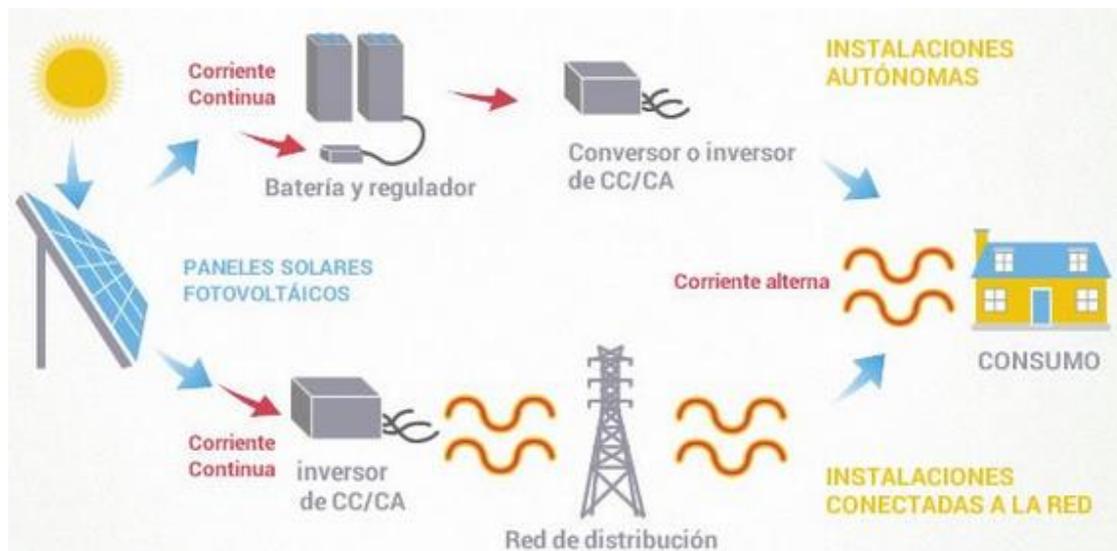
3.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (Fuente [25])

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos que se unen para captar la energía solar disponible transformándola en energía eléctrica para su posterior consumo y utilización.

La electricidad que se genera es corriente continua (CC). El voltaje puede oscilar entre 5 y 900 voltios dependiendo del tipo de panel fotovoltaico o de su método de conexionado.

Esta electricidad en CC puede ser consumida de esa forma o transformarse a corriente alterna (110 a 220 voltios) para poder ser utilizada por aparatos eléctricos tradicionales.

Para cada necesidad o aplicación tendremos que utilizar un sistema distinto y con componentes adaptados a su funcionamiento. A continuación se van a exponer los tipos de sistemas fotovoltaicos que existen, siendo estos sistemas aislados (autónomos) o conectados a la red, así como los componentes que debe utilizar cada sistema.



Fuente Imagen [14]

El componente principal y común a los dos sistemas es el panel fotovoltaico o paneles si hay varios, que son quienes cumplen con el objetivo de transformar la radiación solar en electricidad.

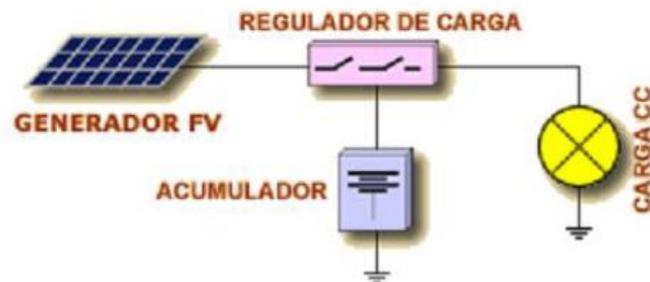
3.3.1. SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO O AUTÓNOMO

Este tipo de sistemas se utilizan para dar electricidad a usuarios que tienen consumos muy bajos (no les compensa pagar la conexión a red) o para los que su ubicación está lejos de las redes eléctricas y no pueden acceder a ellas (a partir de 3 km suele ser recomendable utilizar este tipo de instalación).

Los principales componentes que forman este tipo de sistema fotovoltaico aislado son: módulos fotovoltaicos, reguladores de carga o de tensión, acumuladores de energía y/o inversores.

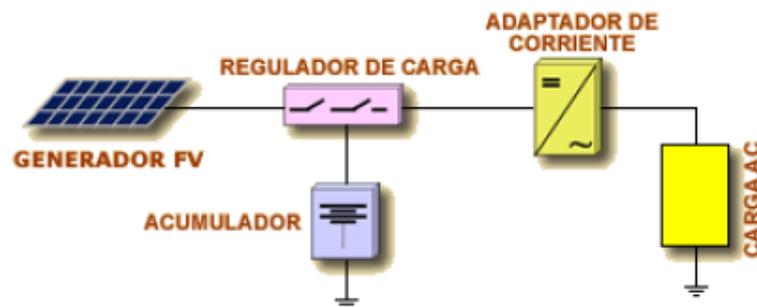
Dependiendo del tipo de carga a la que se conecte la instalación se pueden distinguir dos tipos:

Carga CC: La carga se alimenta con corriente continua.



Fuente Imagen [15]

Carga AC: La carga se alimenta con corriente alterna.



Fuente Imagen [15]

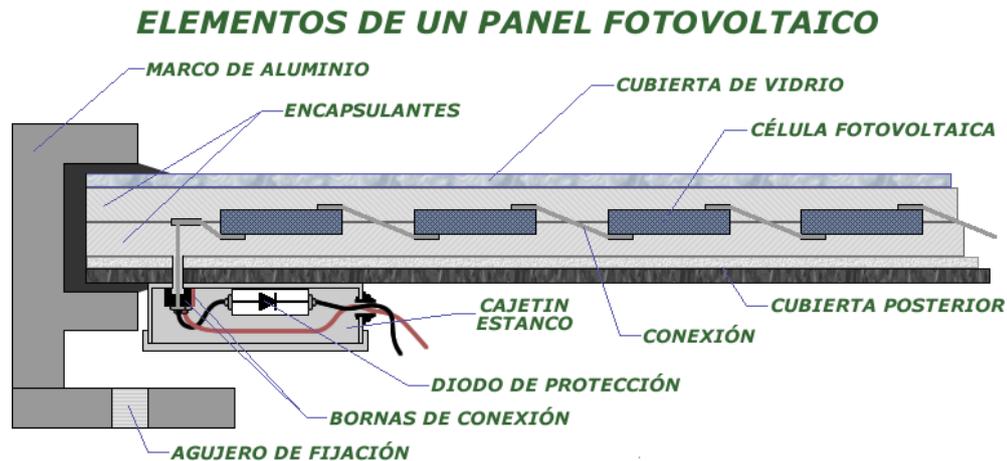
3.3.1.1. Módulo Fotovoltaico

Los módulos fotovoltaicos (colectores fotovoltaicos) están formados por grupos de células fotovoltaicas que al captar la luz incidente sobre ellos, producen electricidad. Estos grupos de células están unidos en un bloque donde se van soldando unos con otros bajo una capa de vidrio.

El tamaño depende de la cantidad de potencia que se requiera, dependiendo de ello, las instalaciones serán más grandes o pequeñas.

ESTRUCTURA DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO

Un módulo fotovoltaico presenta los siguientes elementos:



Elementos Panel. (Fuente [16])

- **Cubierta frontal transparente o de vidrio:** Sirve para dar rigidez y dureza mecánica al módulo fotovoltaico.

El material debe:

- Ser Impermeable al agua.
- Tener buena resistencia a los impactos.
- Ser estable a una exposición prolongada a los rayos del Sol (rayos UV).
- Tener una baja resistividad térmica.
- Poseer una elevada transmisión en el rango de longitudes de onda para poder ser aprovechadas por una célula fotovoltaica.
- Tener una baja reflexión de la superficie frontal para aprovechar al máximo la energía solar incidente.

Los materiales más utilizados son los acrílicos, los polímeros y el cristal (vidrio).

- Encapsulante:** Utilizado para dar adhesión entre las células fotovoltaicas, la superficie posterior y la frontal del módulo.

El material debe ser:

- Impermeable al agua
- Resistente a la fatiga térmica y a la abrasión.

El más utilizado es el EVA.

-Recubrimiento Posterior: Sirve para proteger el módulo en la capa posterior.

El material debe ser:

- Impermeable.
- Con baja resistencia térmica.

Se suele utilizar una película con Tedlar sobre toda la superficie del módulo, aunque algunos modelos llevan una capa de Tedlar y un segundo vidrio.

-Células Fotovoltaicas y sus Conectores: Son cintas que interconexiónan de forma eléctrica las distintas células, se sueldan de forma redundante con 2 conductores en paralelo para aumentar la recolección de portadores en ambas caras de la célula.

Normalmente están hechas de aluminio o acero inoxidable.

-Bornas de Conexión: Se utilizan para permitir el conexionado entre módulos, suelen ir en una caja de conexiones externas adherida con silicona a la parte posterior del módulo, cuenta con bornes de salida, una positiva y otra negativa. Su cierre debe ser hermético y estar protegido para que sea resistente a las condiciones climatológicas. Los cables que conexionan son de cobre.

-Enmarcado y Sistema de Fijación (Marco): Se utiliza para la integración de los distintos componentes del módulo en el mismo y junto con la estructura de soporte.

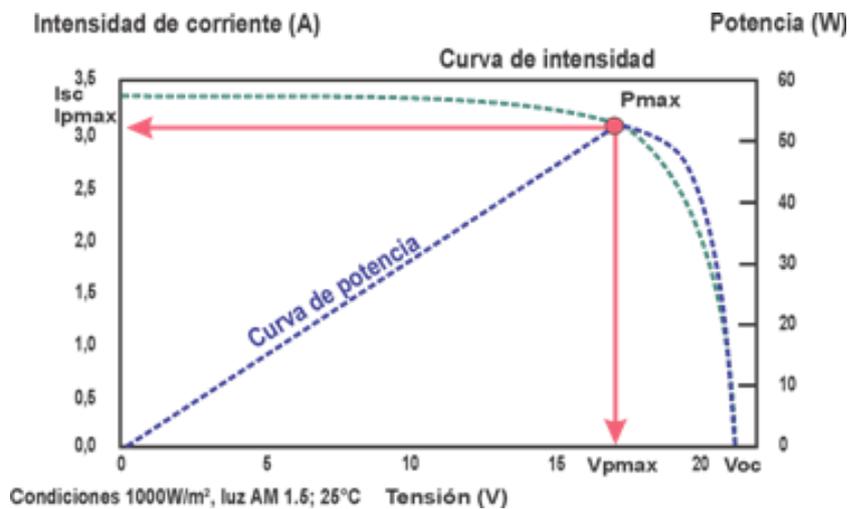
Todo el conjunto del marco va protegido con una junta de neopreno, incrustado en un marco de aluminio que suele estar adherido con silicona.

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y ELÉCTRICAS DEL MODULO

Los productores de módulos suelen garantizar un rendimiento energético del 80% de la capacidad nominal a partir de los 25 años de su utilización. Por ello podemos decir que los módulos proporcionan a las células:

- Resistencia mecánica.

- Protección contra los agentes externos como las condiciones climatológicas, los módulos pueden resistir el frío, el calor, la lluvia, etc.
- Aislamiento eléctrico contra otros aparatos.
- Seguridad de las personas y animales que estén en su entorno.
- Pero el objetivo más importante es favorecer la máxima captación solar en las células evacuando el calor para que el rendimiento mejore.



Fuente Imagen [16]

Dentro de los módulos fotovoltaicos, las células se pueden conectar en serie, paralelo o en serie-paralelo, dependiendo de los valores de tensión o de intensidad deseados (también hay que tener en cuenta que éstos varían con la radiación solar que incide sobre ellas y la temperatura ambiente). Para que además no se produzcan desviaciones o descompensación en su funcionamiento (debido a las células), todas las células de un panel fotovoltaico deben tener los mismos parámetros eléctricos. Por ejemplo, la intensidad de toda una rama de células conectadas en serie se verá limitada por la aquella de ellas que tenga menor intensidad de corriente. Por todo ello, son muy importantes los ensayos de parámetros y características de las células. A continuación se presentan aquellos parámetros que son más importantes a la hora de hacer las pruebas, todo ello mediante la llamada “Curva característica”.

La representación estándar de un dispositivo fotovoltaico es la curva característica corriente - tensión (V-I). Representa las posibles combinaciones de V e I con unas condiciones ambientales concretas. El punto de V e I en el que el módulo trabajará, viene determinado por el tipo de carga a la que esté conectado.

Los principales parámetros característicos corriente-tensión (I-V) del dispositivo fotovoltaico son [19]:

-Tensión de Circuito Abierto (V_{oc}): Es la máxima tensión que proporciona el panel cuando no hay conectada ninguna carga entre los bornes (están al aire) y el panel se encuentra expuesto a luz solar. En esta tensión, la corriente es igual a 0.

-Corriente de Cortocircuito (I_{sc}): Es la máxima intensidad que se genera en el panel cuando no está conectada ninguna carga y se cortocircuitan sus bornes. Este punto corresponde a una tensión igual a 0. El aparato da fallo debido al cortocircuito.

-Potencia Máxima (P_{max}): Punto de máxima potencia (I_{mp} , V_{mp}) en el cual la potencia entregada es máxima bajo unas condiciones de iluminación y temperatura determinadas, obteniéndose el mayor rendimiento posible del panel.

-Factor de Forma (FF): Es la relación entre la potencia máxima que el panel puede entregar y el producto de la corriente de máxima potencia (I_p) y la tensión de máxima potencia (V_p). Este parámetro sirve para conocer la curva característica I-V de los paneles.

-Eficiencia y rendimiento (η): Es el cociente entre la potencia máxima que el panel puede entregar y la potencia de la radiación solar incidente. Dependiendo de la tecnología utilizada a la hora de la fabricación del panel puede llegar hasta el 18%, en algunos casos en la actualidad ha llegado hasta aproximadamente el 44%.

La variación de los parámetros fundamentales de la curva característica V-I con la temperatura vienen representados por 3 coeficientes:

- **Coefficiente de Temperatura de Corriente (α):** Se puede expresar en porcentaje o en grados Celsius. Este coeficiente permite calcular (a partir de valores de temperatura), el valor I_{sc} en función de la temperatura de la célula.

- **Coefficiente de Temperatura de Tensión (β):** Se puede expresar en porcentaje o en grados Celsius. Este coeficiente permite calcular (a partir de valores de temperatura), el valor de V_{oc} en función de la temperatura de la célula.

-**Coefficiente de Temperatura de Potencia (γ):** Se puede expresar en porcentaje o en grados Celsius. Este coeficiente calcula las pérdidas de potencia, permite saber si la cantidad de energía (potencia) de salida de un módulo FV aumentará o disminuirá a medida que se incrementa la temperatura. Por ejemplo si el coeficiente de temperatura de potencia máxima de un panel es -0,5% quiere decir que perderá 0,5% de su potencia de salida por cada grado de temperatura que aumente respecto de los 25° C.

FACTORES QUE AFECTAN A LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

La curva característica corriente - tensión (I-V) del generador fotovoltaico se ve afectada por factores ambientales tales como:

- **La Intensidad de Iluminación (irradiancia):** En general la irradiancia afecta principalmente a la corriente, viendo la siguiente ecuación se puede decir que la intensidad es aproximadamente proporcional a la irradiancia:

$$I_{sc}(G_2) = I_{sc}(G_1) * (G_2 / G_1)$$

Donde $I_{sc}(G_2)$ es la corriente de cortocircuito para un nivel de irradiancia de G_2 , e $I_{sc}(G_1)$ es la corriente para un nivel de irradiancia de G_1 . Esta ecuación es válida para valores de irradiancia a temperatura constante.

- **La Temperatura:** El efecto de ésta, afecta principalmente a los valores de voltaje de la curva característica I-V, y tiene su mayor influencia en el V_{mp} , aunque también modifica los valores del P_{max} y el valor de I_{sc} (ligeramente). Este fenómeno se explicó al exponerse los coeficientes de la curva característica, pues eran los “coeficientes de temperatura”.

- **El Efecto del Contenido Espectral de la Luz:** El espectro tiene pequeñas desviaciones respecto al espectro considerado estándar en la superficie terrestre dependiendo de la época del año y de la hora de medida. Estas desviaciones se puede corregir si se requiere una elevada precisión por tratarse de calibraciones de células o módulos FV.

-**El mantenimiento del Panel:** Otro factor que afecta a las células y módulos FV es el mantenimiento que llevan, es sobretodo preventivo pues no tienen partes móviles sometidas a desgaste, ni requiere cambio de piezas ni lubricación, pero se recomienda realizar revisiones periódicas de la instalación para ver si funcionan correctamente, es importante que vaya bien su rendimiento puesto que por un poco de suciedad en los módulos éste se verá disminuido considerablemente, las pérdidas producidas por suciedad pueden llegar a ser de hasta un 5%. Así, los módulos deben estar limpios y sin obstáculos que pueden impedir el paso de la luz hacia ellos.

3.3.1.2 Regulador de Carga o de Tensión

El encargado de proteger la batería de sobrecargas y sobredescargas es el dispositivo llamado “regulador de carga”.

La batería puede sufrir cambios bruscos debido a que por la noche el voltaje de salida de los módulos es nulo puesto que no hay luz y lo mismo ocurre al amanecer, atardecer o en días nublados, la batería no llega a ser cargada. Cuando la batería ha acumulado, el regulador de carga se dedica a evitar su descarga, y también cuando ocurre lo contrario, si la insolación aumenta actúa evitando una gasificación excesiva de la fuente primaria.

En definitiva, el regulador de tensión siempre controla el estado de carga de las baterías y regula su intensidad para alargar su vida útil. En ocasiones disponen de alarmas que informan de los estados límite. Actualmente éstos llevan integrados microcontroladores para gestionar mejor el sistema fotovoltaico.

Existen dos tipos de reguladores de carga:

-Reguladores lineales: Basan su funcionamiento en la caída de tensión en elementos disipativos. Operan con corriente continua a la entrada y equivalen a una resistencia con valor de ajuste automático. Tienen un rendimiento bajo.

-Reguladores conmutados: Incorporan un conmutador que interrumpe la corriente en la fuente primera a intervalos de duración variable. Tienen un rendimiento elevado.

3.3.1.3. Banco de Baterías o Acumulador de Energía

Es el dispositivo mediante el cual se almacena la energía eléctrica, ésta se transforma en energía química para ser almacenada (este proceso es reversible).

La energía fotovoltaica se utiliza mientras hay luz, pero es necesaria almacenarla para los momentos en los que no haya sol o incluso para momentos en los que la energía proporcionada no es la suficiente o la adecuada de cara a satisfacer la demanda puesto que la mayor demanda se produce al atardecer y por la noche, en horas que precisamente no hay luz para que funcionen los paneles fotovoltaicos.

Por ello, la batería ofrece una disponibilidad de energía de manera uniforme durante todo el año, algo que sobretodo es muy importante en este tipo de sistemas aislados de la red eléctrica.

3.3.1.4. Inversor o Adaptador de Corriente

Se utiliza para convertir la energía eléctrica de corriente continua (previamente transformada por los paneles FV) en corriente alterna monofásica para poder ser

inyectada a la red de suministro eléctrico. La tensión generada por el inversor es sinodal y se obtiene mediante la técnica de modulación de ancho de pulsos, y un microcontrolador determina el tipo de onda que se genera.

Los inversores detectan continuamente el P_{max} de la curva característica anteriormente expuesta para trabajar con ella y conseguir el mejor rendimiento de la instalación. Este punto es variable y depende de los factores ambientales como la radiación recibida.

Por la noche, el inversor está parado, vigilando valores, y al amanecer que es cuando la tensión del generador aumenta se pone en funcionamiento y comienza a inyectar corriente a la red.

Existen dos tipos de inversores:

-Los inversores conmutados de línea: usan interruptores basados en tiristores.

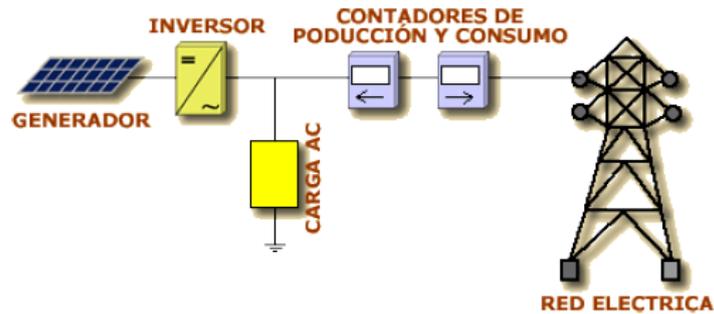
-Los inversores autoconmutados usan dispositivos de conmutación que controlan libremente los estados de conducción y no conducción del interruptor, como son los transistores IGBT y MOSFET.

3.3.2. SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A RED

Estos sistemas no suelen tener acumuladores de energía eléctrica ya que la energía que producen los paneles solares durante las horas de sol es canalizada a la red eléctrica, y al contrario cuando la insolación es escasa y hace falta más energía, la carga viene alimentada por la red. Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red son más fiables en ese sentido, pues su servicio es continuo.

En definitiva, la tarea de este tipo de sistemas es la de introducir la mayor cantidad posible de energía a la red, eso sí, siempre cumpliendo los requisitos demandados por la compañía eléctrica (tienen que tener una determinada tensión, frecuencia y calidad de onda). Suelen ocupar grandes extensiones de terreno denominados “huerta solar”.

A continuación se puede observar un esquema de un sistema fotovoltaico conectada a la red eléctrica:



Fuente Imagen [17]

Los principales componentes que lo suelen formar son: módulos fotovoltaicos, dispositivo de intercambio con la red eléctrica, inversor para la conexión a red y un contador de energía bidireccional.

3.3.2.1. Módulos Fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos aislados tienen en común con los sistemas conectados a la red a los módulos FV. Se ha expuesto en el apartado anterior (Ver punto 2.1.1).

3.3.2.2. Inversor

Uno de los elementos más importantes de los sistemas conectados a la red, es un dispositivo que transforma la energía continua que se ha producido por los paneles (12v, 24v, 48v) en energía alterna (normalmente 220v), para alimentar el sistema e introducirla en la red.

3.3.2.3. Dispositivo de Intercambio con la Red

En el momento en el que la energía introducida a la red tenga que tener todas las características requeridas por la misma, es donde entra en juego este dispositivo.

3.3.2.4. Contador de Energía

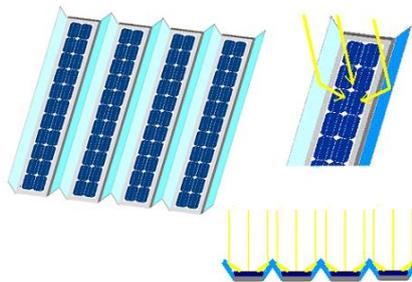
Mide la energía eléctrica producida por el sistema fotovoltaico durante su periodo de funcionamiento.

3.3.3. TIPOS DE PANELES EN FUNCIÓN DE LA FORMA

Es posible también, clasificar los tipos de paneles en función de su forma. Para adaptarse a alguna aplicación en concreto (tejados o huertas solares) o para obtener un rendimiento mayor.

Algunos ejemplos de tipos de paneles según su forma y distintos al típico son:

-Paneles con sistemas de concentración: Mediante una serie de superficies reflectantes se intenta concentrar más luz sobre los paneles solares. Aunque el % de conversión no varía, se producirá más electricidad ya que una misma superficie del módulo recibe una cantidad concentrada de fotones mayor que la que recibiría sin el elemento reflectante (suelen ser lentes). Actualmente se están investigando para lograr aumentar el rendimiento de las células y disminuir los costes.



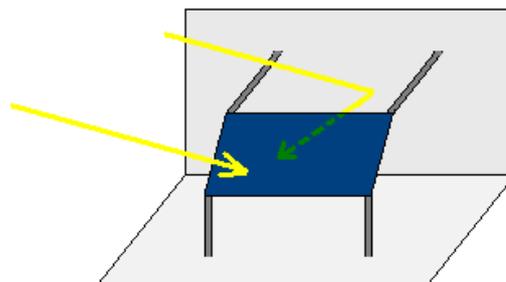
Fuente Imagen [18]

-Paneles de formato “teja o baldosa”: Paneles de pequeño tamaño que están pensados para unir varios de ellos para cubrir grandes superficies como pueden ser los tejados de las viviendas. Pueden cubrir grandes demandas energéticas.



Fuente Imagen [18]

-Paneles bifaciales: Capaz de captar y transformar en electricidad la radiación solar que recibe por sus 2 caras (frontal y posterior). Para aprovecharlos más se suele colocar sobre 2 superficies blancas que reflejan luz hacia la parte posterior del panel.



Fuente Imagen [18]

3.3.4. SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR

Estos sistemas se utilizan para aumentar la captación de luz solar y con ello aumentar la eficiencia. Son dispositivos y soportes que ayudan a que el panel siga el movimiento del sol.

Existen tres tipos de soporte para los módulos solares:

– **Colocación Sobre Soporte Estático:** Soporte sencillo y estático (no se mueve ni sigue al sol). Dependiendo de la latitud y aplicación que se requiera, se dotará a los paneles mayor o menor inclinación para captar mejor la luz solar.

– **Sistemas de Seguimiento Solar de 1 Eje:** Estos soportes realizan un seguimiento solar pero la rotación del soporte se hace por medio de un solo eje, ya sea horizontal, vertical u oblicuo. Es el método más sencillo y económico aunque tiene un problema y es que sólo puede seguir o la inclinación o el azimut del Sol, ambas a la vez no (estas variables se explican en el siguiente punto).

– **Sistemas de Seguimiento Solar de Dos Ejes:** Con este sistema ya es posible realizar un seguimiento total del sol en altitud y en azimut y siempre se conseguirá que la radiación solar incida perpendicularmente obteniéndose la mayor captación posible.

Existen tres sistemas básicos de regulación del seguimiento del sol por dos ejes: los sistemas mecánicos (con engranajes), mediante dispositivos de ajuste automático (con sensores) y los Dispositivos sin motor (utilizando gases o evaporación).

Con estos sistemas se puede lograr un aumento de hasta el 30-40% de la energía captada, según estimaciones.

3.4. EL SOL Y SU ENERGÍA

3.4.1. LA RADIACIÓN SOLAR

El Sol es la mayor fuente de energía que tenemos en la Tierra, prueba de ello es que tiene una elevada importancia dentro del funcionamiento y utilización de las energías renovables (como vimos en el punto 2.2), es el mayor recurso que hay y sin él no sería posible la vida. El Sol es una estrella cuya temperatura media es de aproximadamente unos 5.500 °C, en su interior se dan una serie de reacciones de fusión en las que los átomos de hidrógeno se transforman en helio, lo que produce

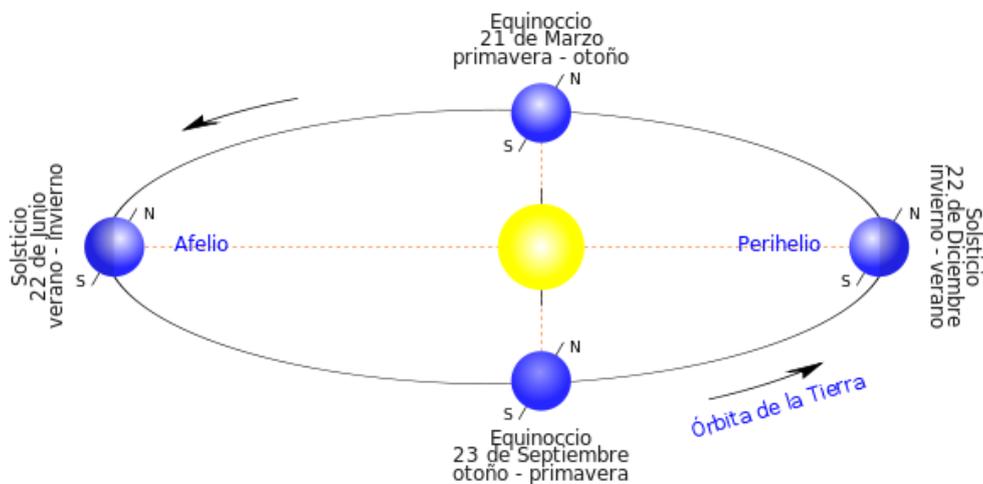
una pérdida de masa que se transforma en energía que es liberada y transmitida al exterior mediante la “Radiación Solar”.

Se prevé que seguirá en esta fase estable unos 5.000 millones de años más, debido a esto, la energía solar fotovoltaica es una energía renovable pues es inagotable en la actualidad y en un futuro lejano.

Este flujo constante de energía llamado “radiación solar” llega a La Tierra en forma de ondas electromagnéticas contando con diferentes longitudes de onda (la mayor parte de la energía está comprendida en una longitud de onda de 350 y 700 nm dentro de la zona visible del espectro). Las radiaciones que menor cantidad de radiación tienen son las ultravioletas.

Las ondas que llegan viajan a través de una distancia entre el Sol y la Tierra que varía entre 147 y 152 millones de km. El valor medio es 1,496·10¹¹ km. El movimiento que la Tierra realiza alrededor del Sol es elíptico, quedando el Sol en uno de los focos, por eso, la distancia Tierra-Sol varía diariamente y de ahí sus cambios de temperatura y radiación (estando relacionado todo esto con la “constante solar”).

Se llama “constante solar” a la radiación recibida fuera de la atmósfera sobre una superficie perpendicular a los rayos solares y cuyo valor está entre 1.353 W/m² y 1.395 W/m², este valor corresponde a un valor máximo en el perihelio (lugar donde un planeta se encuentra más cercano al sol) y un valor mínimo en el afelio (lugar donde un planeta se encuentra más alejado del sol) con 1308 W/m². Dichos valores son variables durante el año un $\pm 3\%$ a causa de la elipticidad de la órbita terrestre, la cual se puede ver en la siguiente imagen:



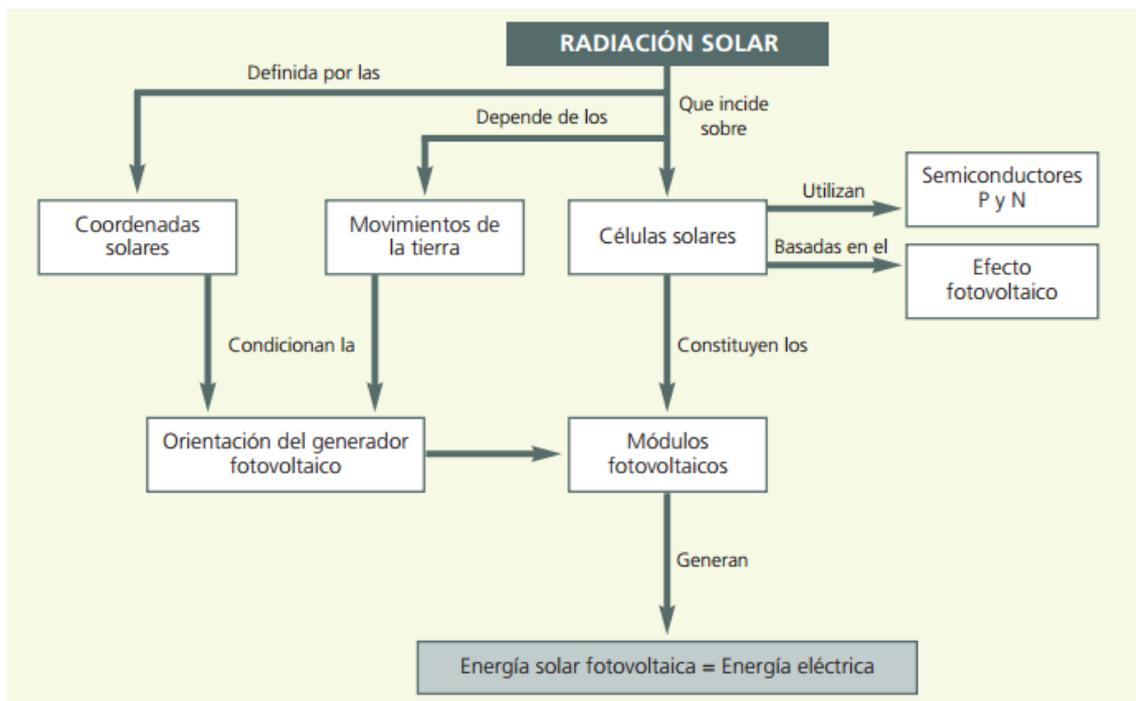
Fuente Imagen [19]

Pero de forma general, para determinar la radiación que llega a un determinado punto de la superficie de la tierra, como puede ser un módulo solar, suponemos que la radiación del sol es $63.450.720 \text{ W/m}^2$ y que emite en todas las direcciones en forma de esfera hasta que llega a la tierra con un radio de 149,6 millones de km. La máxima radiación directa que incide sobre un panel solar horizontal durante un día despejado y claro sin lluvia, nubes ni suciedad, a nivel del mar y estando el Sol en la posición de Zenit (punto más alto del sol cuando está sobre el horizonte) sobre el módulo solar, se denomina “pico de irradiancia u hora solar pico” que se explicará más adelante. Si se cumplen todas esas condiciones la irradiancia es aproximadamente un 1000 W/m^2 . La medida sería: 1 hora solar pico = 1000 W-h/m^2 .

Solamente llega un $1/3$ aproximadamente de la energía total captada por la atmósfera y un 70% de esa energía se pierde en el mar, sin embargo, la “poca” cantidad que queda se aprovecha y es varias miles de veces el consumo energético mundial.

En la siguiente imagen se puede ver como interactúa la radiación solar hasta que se produce electricidad en un panel.

3.4.2. TIPOS DE RADIACIÓN SOLAR (Fuente [22])



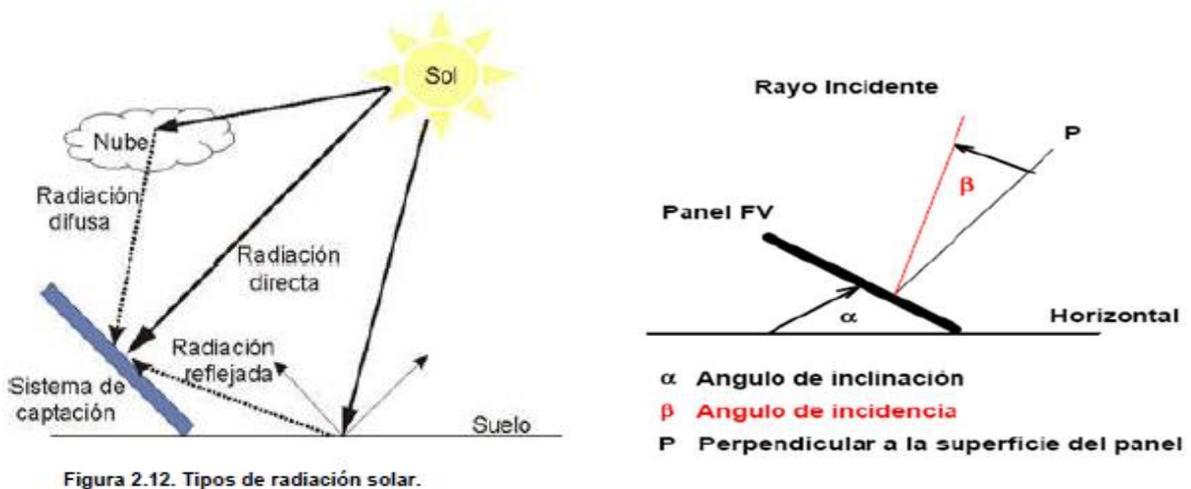
Aun así, los cálculos sobre la cantidad de radiación que es aprovechada por los paneles solares fotovoltaicos es más compleja, pues estos inciden en ellos con diferentes ángulos y formas teniendo como condicionamiento los factores atmosféricos y estaciones del año. Existen 3 formas en los que los rayos inciden sobre los módulos fotovoltaicos y en general para cualquier cuerpo terrestre:

- **Directa:** Es aquella que llega directamente del Sol (sin reflexiones, refracciones y sin desviarse en su paso por la atmósfera) hasta algún objeto o superficie terrestre. Se suele concentrar para utilizarla en varias aplicaciones. Proyecta sombra de los objetos en los que incide, a ésta sombra la puede llegar radiación difusa.

- **Difusa:** Cuando llega la radiación a la atmosfera, sufre cambios de dirección producidos por las partículas de polvo, obstáculos atmosféricos (nubes), montañas, árboles, edificios, etc.

Como consecuencia de las constantes reflexiones va perdiendo energía. No proyecta la sombra de los objetos por los que pasa.

- **Albedo (reflejada):** Es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.



Fuentes Imagen [20]

En un día claro, habrá mucha más radiación directa que difusa y al contrario, si un día está nublado la radiación directa será escasa y se recibirá radiación difusa. Las tres componentes (directa, difusa y albedo) son aprovechables, es más para el aprovechamiento de los paneles fotovoltaicos cuanto más altos sean los niveles de

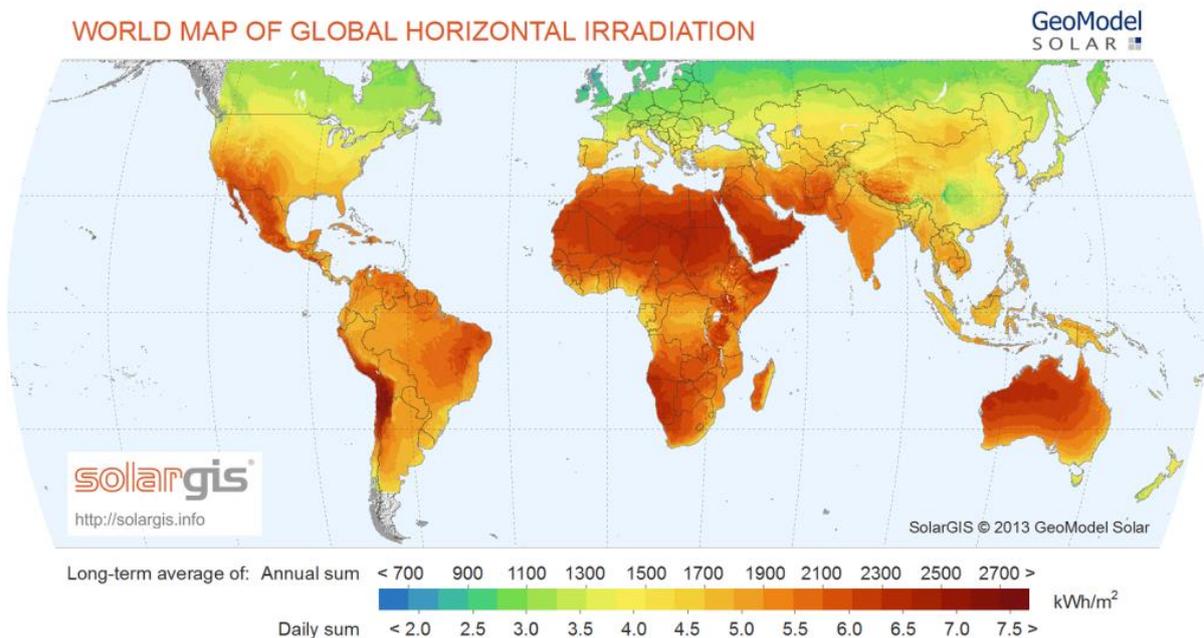
las tres componentes mejor, aunque la más importante para estos sistemas solares fotovoltaicos sea la radiación directa.

Todos estos niveles de radiación, como hemos dicho dependen de las condiciones meteorológicas, la inclinación de la superficie respecto al plano horizontal (una superficie horizontal recibe la máxima radiación difusa y la mínima reflejada), la presencia de superficies reflectantes y del mantenimiento del panel (debe estar limpio).

3.4.3. LA IRRADIANCIA Y LA IRRADIACIÓN

Es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. Como anteriormente dijimos, la irradiancia no tiene un valor único ya que aumenta o disminuye dependiendo de la distancia tierra-sol, y su unidad de medida en el sistema internacional es W/m^2 .

Es importante saber que no es lo mismo irradiancia e irradiación [4], pues la irradiancia es la energía por unidad de superficie kWh/m^2



Las zonas rojas son de mayor “irradiancia” o mayor “Hora Solar Pico”. Ahí vemos cómo dependiendo de lugar de la tierra en el que nos encontremos, la cantidad de sol varía, con lo que la energía solar se puede aprovechar más en ciertos países.

Hay que tener en cuenta que España se sitúa en un sitio privilegiado respecto a Europa en cuanto a situación geográfica y climatológica, ya que tiene más horas de sol que otros países más nórdicos. Esto hace que España sea uno de los países con más vías de desarrollo y aprovechamiento de esta fuente de energía.

3.4.4. INSOLACIÓN

Es la acumulación de energía promedio durante un período de Tiempo (día, mes, anual, estacional). Equivaldría a la irradiancia pero considerando un cierto periodo de tiempo determinado sobre una superficie [4], por ejemplo puede haber insolación diurna o insolación anual. Por eso se utilizan las Unidades de Energía por Unidades de Área.

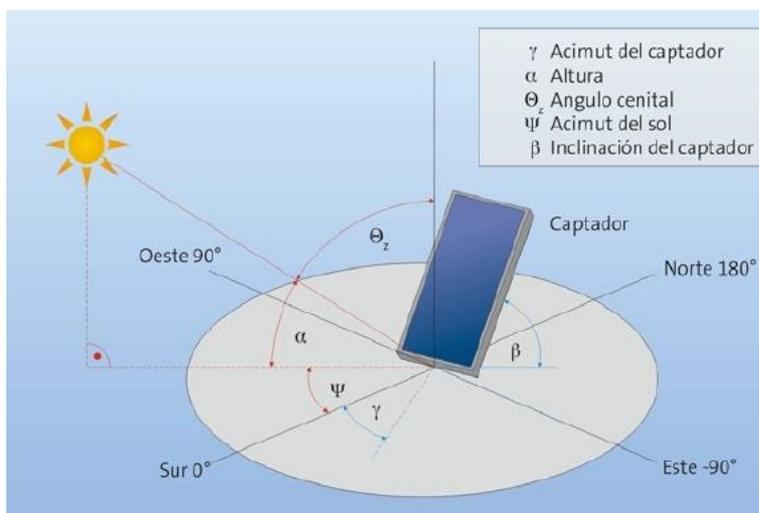
Las unidades en SI de la insolación son: Langley (cal/cm^2), MJ/m^2 , BTU/ft^2 , kWh/m^2

Hora solar pico se consideraría como la mayor insolación en un área o ciudad y en un tiempo o período de tiempo determinado.

Un aspecto muy importante a considerar es que la energía útil que entrega un módulo FV es directamente proporcional a la insolación incidente, por ello es importante el diseño de los sistemas solares para captar la máxima posible.

Dependiendo de la instalación, se pueden poner paneles con sistemas de seguimiento hacia el sol, para que la radiación de éste llegue lo más perpendicular posible a la cara del módulo o paneles estáticos sin movimiento.

Con el fin de conocer el movimiento del Sol, se utiliza un sistema de coordenadas con varios ángulos, que permite saber en cada momento donde se encuentra. Los ángulos se pueden ver en la siguiente imagen:



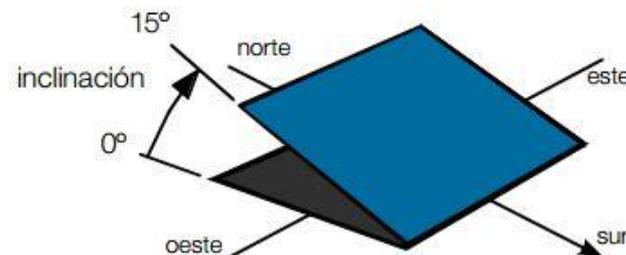
Fuente Imagen [21]

3.4.5. CONCLUSIONES PARA ORIENTAR BIEN UN PANEL SOLAR:

Para un correcto posicionamiento y aprovechamiento de un panel solar, se deberá conocer la posición relativa entre la tierra y el sol de forma que se pueda calcular con precisión la cantidad de radiación que alcanza la superficie. De esta posición tierra-sol, depende que al amanecer, mediodía, atardecer, en las estaciones o hemisferios la radiación varíe, es importante tenerlo en cuenta para aprovechar al máximo la captación de energía solar.

Así, se presenta un resumen de lo que sería recomendable respecto a dirección y posicionamiento de un panel solar fotovoltaico para una máxima captación de energía solar:

- Un panel en el hemisferio norte de la tierra → Colocar mirando hacia el sur.
- Un panel en el hemisferio sur de la tierra → Colocar mirando al norte.
- El panel solar se deberá instalar con un ángulo de inclinación (respecto de la horizontal en el terreno), igual al valor de la latitud en ese mismo lugar.



Fuente Imagen [22]

Un estudio de la compañía Opower, realizado recientemente en el año 2014 en California, explica que si los paneles solares fotovoltaicos se orientaran hacia el Oeste (en vez de hacia el sur), se optimizaría la producción energética de los mismos.

Se prevé que con esta orientación se cubriría parte del pico de la demanda que se produce al final de la tarde para la mayoría de los países que están industrializados [5].

3.5. LA CÉLULA FOTOVOLTAICA. EL EFECTO FOTOELÉCTRICO Y LOS SEMICONDUCTORES

3.5.1. EL EFECTO FOTOELÉCTRICO Y LOS SEMICONDUCTORES (Fuente [22])

La energía solar fotovoltaica se obtiene a través de la transformación de la energía de la luz solar proveniente del Sol en energía eléctrica, mediante la utilización de la “célula fotovoltaica” que es un dispositivo electrónico cuyo grosor varía entre los 0,25 mm y los 0,35 mm, de forma cuadrada y con una superficie aproximadamente de 100 cm². Esta conversión de energía se produce gracias al “efecto fotoeléctrico” que tiene lugar en las células.

Para explicar todo esto y el tipo de material que se utiliza en la célula FV, primero veremos qué son los electrones de valencia. En un átomo, los electrones giran alrededor del núcleo en distintas bandas de energía y compensando la carga positiva de éste y formando un conjunto estable y eléctricamente neutro. A los electrones de la última capa se los denomina “electrones de valencia” y éstos interrelacionan con otros similares formando así una red cristalina.

Existen tres tipos de materiales (hablando eléctricamente):

- **Los Conductores:** Conductores de valencia que están poco ligados al núcleo y pueden moverse con facilidad dentro de la red cristalina animándolos con un pequeño agente externo.
- **Los Semiconductores:** En este caso, los electrones de valencia están más arraigados al núcleo pero dándolos una pequeña cantidad de energía se pueden comportar como conductores.
- **Los Aislantes:** Poseen una configuración muy estable pues tienen los electrones de valencia muy ligados al núcleo y la energía que hay que darlos para separarlos de él es muy grande.

Los materiales que se utilizan en las células fotovoltaicas son los semiconductores. Es una de las partes más importantes del panel fotovoltaico al ser en la capa de semiconductores donde se genera la corriente de electrones y por tanto la electricidad.

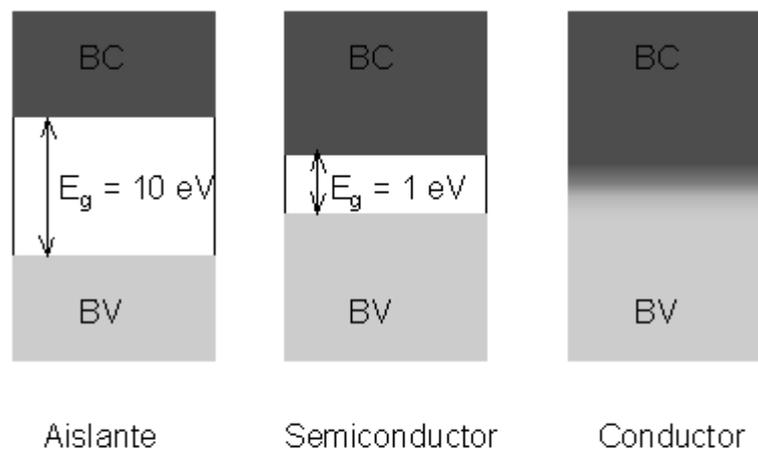
A continuación, explicaremos el proceso de formación de la corriente de electrones, llamado como hemos dicho anteriormente “efecto fotoeléctrico”:

El origen sería el Sol, pues nos llega la luz solar que está compuesta por fotones que son partículas de energía que tienen cantidades de energía distintas según correspondan a las diferentes longitudes de onda del espectro solar, estas ondas

son la radiación electromagnética que se explicó en puntos anteriores. Cuando estos fotones inciden sobre la célula FV, pueden ser reflejados, pueden pasar a través de ella o ser absorbidos en la misma. Solamente en este último caso se genera electricidad, cuando los fotones son absorbidos.

Pero para que se produzca la corriente eléctrica (efecto fotovoltaico) cuando incide la energía en el semiconductor, los fotones tienen que tener una energía mayor que el valor mínimo determinado, llamado ancho de banda prohibida (E_g). El E_g es la cantidad concreta de energía que es necesaria para que un electrón pase de la capa de valencia a la de conducción, a esta diferencia de ancho de banda se la denomina también “banda prohibida de energía o Gap”, se explicará ahora con más detalle los tipos que hay.

En la siguiente imagen vemos como en un material conductor, no existe dicha banda, las capas de valencia (BV) y de conducción (BC) están solapadas y ello hace que con una energía mínima que se le dé al material, éste generará electricidad pues sus electrones fluyen rápidamente de la banda de valencia a la de conducción.



$$T = 300 \text{ K} \quad E_g(\text{Si}) = 1,12 \text{ eV}$$
$$E_g(\text{Ge}) = 0,66 \text{ eV}$$

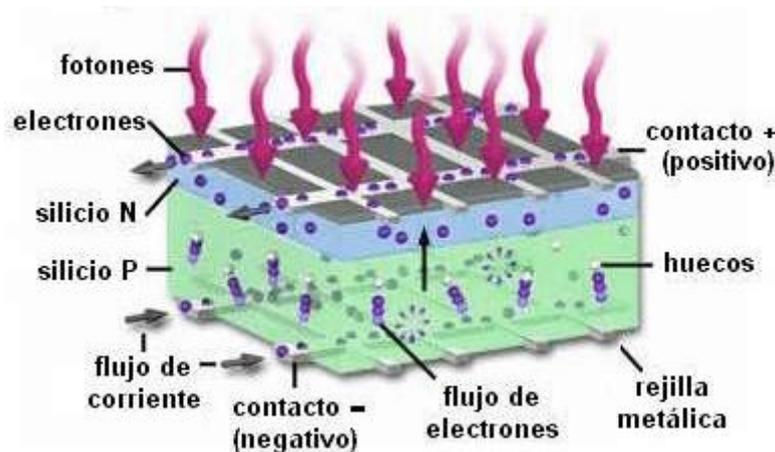
Fuente Imagen [23]

De forma contraria, en los materiales aislantes, el ancho de la banda prohibida es muy grande y por ese motivo se necesita aplicar una gran cantidad de energía para que los electrones pasen de la banda de valencia a la de conducción (lo cual no suele interesar en la mayoría de las aplicaciones de estos materiales, se utilizan más para “cortar” el flujo de electricidad).

Después de entender un poco mejor el funcionamiento de la banda prohibida, llegamos a los materiales semiconductores que son los importantes para este proyecto, las bandas de valencia y conducción de éstos se encuentran separadas por un pequeño Gap de energía, la cual es bastante menor que la de los aislantes. La cantidad de electrones que tienen a 0K (grados Kelvin) ocupan toda la banda de valencia estando la banda de conducción vacía, por eso los semiconductores puros a esa temperatura se comportan como aislantes, sin embargo si se les da algo de energía externa (por lo tanto se aumenta la temperatura como en el caso de la radiación solar), algunos electrones se liberan del enlace dejando un estado de energía vacío (un hueco) el cual puede ser ocupado por el electrón vecino. Este movimiento de electrones de valencia hacia los huecos, así como hacia la banda de conducción, hace que se genere la corriente eléctrica.

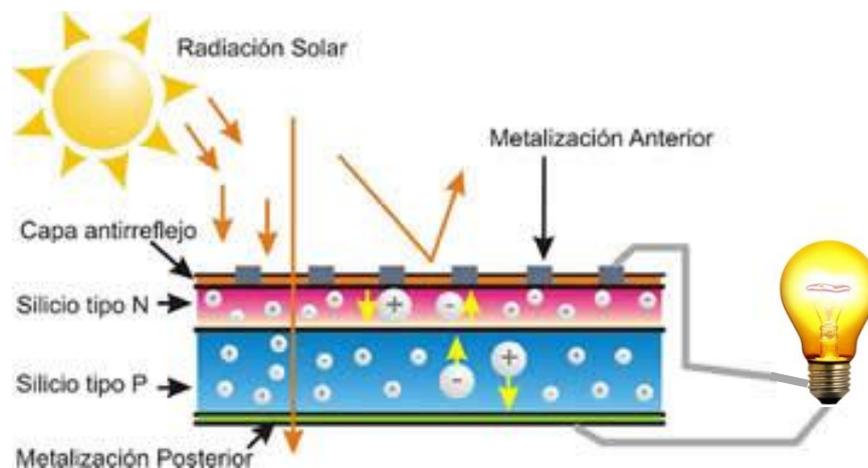
Cuando la concentración de electrones n es igual a la concentración de huecos p se los denomina concentraciones intrínsecas de un semiconductor, esto se produce para los semiconductores que son absolutamente puros donde la conducción por electrones y huecos es la consecuencia de la rotura de los enlaces entre sus átomos.

Se denominan concentraciones extrínsecas cuando se introducen elementos especiales o impurezas dopantes que pueden controlar la concentración relativa de electrones en la BC y de huecos en la BV. Estas impurezas pueden ser a su vez, donoras (aportan electrones a la BC) oceptoras (quitan electrones de la BV). En el caso de las donoras, hay muchos más electrones que huecos y como la corriente eléctrica se debe más al movimiento de electrones se les llama semiconductores de tipo n (negativo), y en el caso de laceptoras, ocurre lo contrario, hay más concentración de huecos que de electrones, los portadores de la corriente son los huecos y se le llama semiconductor de tipo p (positivo).



Fuente Imagen [24]

Así, cuando un fotón incide sobre el semiconductor, como consecuencia de todo esto, el llamado efecto fotoeléctrico, se genera una corriente eléctrica (dependiendo de la temperatura) que conduce durante todo el rato en la dirección de la unión $p-n$ porque los electrones libres del semiconductor de tipo “n” tienden a ocupar los huecos del material tipo “p” y viceversa. Este proceso continúa hasta que el intercambio entre electrones y huecos es estable consiguiéndose un campo eléctrico permanente sin la ayuda de energía externa, sólo utilizando la luz incidente en la célula, en la cual su intensidad eléctrica será proporcional a la cantidad de luz recibida en la misma.



Fuente Imagen [25]

En definitiva, la célula FV es un semiconductor con dos caras tratadas artificialmente (dopadas) que tienen concentraciones de electrones distintas, la parte que se ve expuesta a la luz es la cara tipo n y la cara posterior la tipo p, a esta unión de la insertan contactos metálicos en ambas caras (la parte vista con rejillas y la posterior puede ser una placa entera) los cuales sirven para recoger la energía eléctrica generada en la célula para su posterior uso.

El semiconductor más común y utilizado para las células FV es el silicio que tiene una energía de Gap de 1,12 eV (electrón-voltios)

El silicio es el semiconductor más común utilizado en las células fotovoltaicas. Cuenta con una energía de gap de 1,12 eV. Las impurezas que se le suele añadir son de fósforo, arsénico, boro o galio, según el que sea será semiconductor de tipo p o de tipo n.

Relacionada con la energía de Gap está la eficiencia máxima de las células que viene determinada por la parte del espectro solar total que puede utilizar cada uno

de los materiales semiconductores. La eficiencia máxima teórica que se puede alcanzar hasta el momento es de 46% para una energía de Gap de 0,9 eV, de este modo el silicio con 1,12 eV o el GaAs con 1,43 eV solamente podrán utilizar el 23,6%, en el caso del silicio usa el 12-14% ya que se desaprovechan las longitudes de onda más energéticas (azul e ultravioletas) que en vez de electricidad se convierten en calor, algo que afecta negativamente a la células FV si aumenta demasiado.

Una sola célula tiene poca potencia, genera un voltaje en circuito abierto alrededor de los 0,6 V y una corriente de cortocircuito que depende del área pero suele ser de 3 A (para 100 cm²), con lo que las células se asocian en serie, en paralelo o en una combinación de ambas según se cubra o no la potencia demandada.

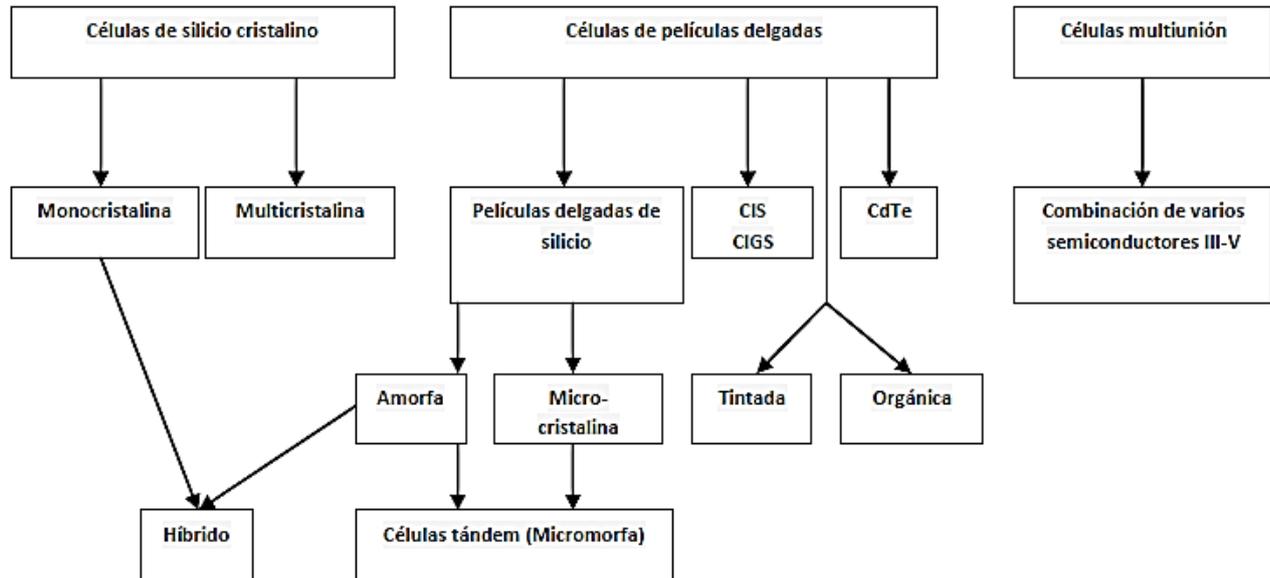
Por último, decir que hay tres aspectos que afectan a todos los materiales semiconductores y por lo cuales se eligen unos u otros para la fabricación de las células FV:

- **Cristalinidad:** Indica la ordenación de los átomos en la estructura cristalina. Como por ejemplo el Silicio que puede aparecer en varias formas: monocristalino, policristalino o amorfo.
- **Coefficiente de absorción:** Indica cómo la luz puede penetrar el material antes de ser absorbida. Influyen factores como el material que hay encima de la célula o la longitud de onda o energía de la luz que es absorbida. Un coeficiente pequeño quiere decir que el material no absorbe fácilmente la luz incidente.
- **Coste y complejidad de fabricación:** Depende del material semiconductor utilizado.

3.5.2. TIPOS DE CELULAS Y MATERIALES DE FABRICACIÓN

Existen distintos tipos de tecnología de las células fotovoltaicas dependiendo del material semiconductor que se utilice, se muestran en el siguiente gráfico.

Y a continuación se detallaran cada una de ellas, dependiendo de la generación a la que pertenezcan, habiendo 4 tipos de generaciones (Fuentes [23] y [27]).



3.5.2.1. Primera Generación de Células Fotovoltaicas:

La primera generación de células fotovoltaicas se basa en el empleo del silicio como material semiconductor [17], silicio cristalino Si-c (monocrystalino, Si-sc, y multicristalino, Si-mc).

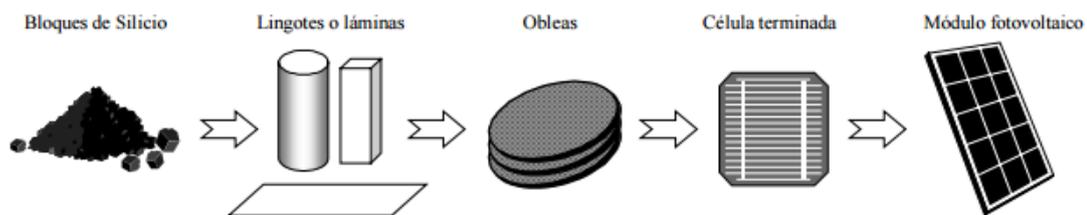
Los motivos por los cuales las células de silicio son las más utilizadas:

- Son las más desarrolladas y usadas comercialmente debido a su desarrollo tecnológico.
- Las características electrónicas no son óptimas pero los requerimientos de pureza del *Si* para celdas son suficientes con menor calidad, pudiéndose aprovechar para paneles FV lo que sobra de la industria electrónica.
- Es uno de los elementos más abundantes en la Tierra.
- En una tecnología con elevado nivel de madurez (nivel comercial alto).
- Ofrecen gran rendimiento, transforma un gran porcentaje de luz solar en energía.
- Estabilidad temporal con una eficiencia del 80% más allá de los 30 años.
- Sus cualidades eléctricas, químicas y mecánicas son uniformes.

- El montaje, los costos de mantenimiento e inversión son bastante bajos.

Sin embargo, aún se están investigando nuevos paneles hechos con este material para mejorar la eficiencia y solventar los problemas que tiene como disminuir los costos de fabricación y la cantidad de silicio utilizada por cada panel (grs/W) pues aunque haya mucha cantidad de silicio en la tierra, sólo un pequeño porcentaje de la cantidad rechazada por la industria electrónica se destina a la energía solar fotovoltaica.

Las células se obtienen mediante un proceso que consiste en laminar lingotes de silicio obteniéndose así las denominadas “obleas” a las que posteriormente se las dota del sistema de conducción y se interconectan entre sí en los módulos como se explicó en puntos anteriores.



Proceso de fabricación de un módulo de silicio.

Fuente Imagen [26]

Existen dos tipos de células de silicio cristalino dependiendo de la forma del cristal original:

- **Células Monocristalinas**
- **Células Policristalinas**

Las células de silicio monocristalino se obtienen a partir de un único cristal de silicio puro de forma cilíndrica. Como provienen de un cristal puro, su rendimiento es mayor, pero su coste también. Estas células generalmente son un azul uniforme. La potencia por cada panel suele oscilar entre 80 y 200 Wp. Los costes de inversión de un sistema fotovoltaico con esta tecnología están entre 3.750 y 6.250 USD/KWp (siendo los costes de mantenimiento tan sólo un 1% de esa inversión según el IEA 2010, Tech. Roadmap). Alcanzan un factor de planta (indicación de la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo) entre un 11% y un 30% [NREL, 2010] siendo el factor normal para paneles solares de un 15%. Tienen una alta eficiencia de conversión energética.



Fuentes Imagen [27]

Ventajas del Monocristalino:

- Buen rendimiento actual entre un 15% y 19% de eficiencia, con previsiones futuras de 21 -25% para los años 2020 y 2050.
- Número de fabricantes elevado.
- Buena relación $Wp\ m^2$ (~150 WC/m^2 , se puede ahorrar en espacio).
- En laboratorio se han alcanzado rendimientos máximos del 24,7%.
- Presenta una estructura completamente ordenada.
- Su comportamiento uniforme lo hace buen conductor.

Inconvenientes del Monocristalino:

- Coste elevado.
- Fabricación complicada.
- Células relativamente gruesas en comparación con las que se están investigando. Se requiere bastante silicio.

Las células de silicio policristalino, se consiguen a partir de bloques de silicio que se obtienen mediante la fusión de trozos de silicio puro en moldes especiales. En estos moldes el silicio se va enfriando poco a poco y va pasando al estado sólido en cual se forman varios cristales, no como en el monocristalino que los átomos sólo se organizaban en un único cristal. La célula es de color azulado pero se distinguen (como se puede ver en la imagen) los diferentes colores creados por los diferentes cristales. Su coste es menor, pero su eficiencia también.



Fuentes Imagen [28]

Alcanzan un factor de planta próximo al 20% [según NREL, 2010]. La potencia de cada panel oscila entre los 5 y 300 Wp. Los costos de inversión del sistema fotovoltaico incluyendo montaje, soportes y cableado rondan los 3.750 y 6.250 USD/KWp (siendo un 1% de la inversión para el mantenimiento solamente, como ocurría con los monocristalinos).

Ventajas de los Policristalinos:

- Buen rendimiento entre el 12-15 %.
- Células cuadradas que permite un mejor funcionamiento en un módulo.
- Eficiencia de conversión óptima, alrededor de 100 Wp/m², pero un poco menor que en el monocristalino.
- Lingote más barato de producir que el monocristalino.
- Presenta una estructura ordenada por regiones separadas.
- Se obtiene de igual forma que la de silicio monocristalino pero con menos fases de cristalización.

Inconvenientes de los Policristalinos:

- Bajo rendimiento en condiciones de iluminación escasa.
- Los enlaces irregulares de las fronteras cristalinas disminuyen el rendimiento de la célula.
- Células relativamente gruesas en comparación con las que se están investigando. Se requiere bastante silicio.

Proceso de fabricación detallado de las células monocristalinas:

Las células de silicio monocristalino están formadas por un cristal de máxima pureza de silicio, sin apenas defectos. Esto se puede conseguir utilizando el silicio policristalino mediante dos métodos diferentes, el método Czochralski y el método de Zona Flotante.

El método Czochralski consiste en que, inicialmente, el silicio policristalino se funde en un crisol a una temperatura alrededor de 1400 °C, después el silicio fundido se pone en contacto con una “semilla cristalina” que es un pequeño cristal colocado en el fondo de un molde vertical, y se somete a un movimiento de giro. La semilla cristalina se funde un poco cuando entra en contacto con el silicio fundido, pero al hacerla girar se consigue que los átomos de silicio fundido vayan agrupándose a su alrededor y al enfriarse, se van fijando en las posiciones que determina la semilla cristalina. Como consecuencia se obtiene un lingote cilíndrico de Si-sc. Este método Czochralski es el más usado comercialmente y el más económico.

Con el **método de Zona Flotante** se produce un cristal más puro que en el anterior. Inicialmente se tiene una columna vertical de silicio policristalino sujeta en sus extremos por dos soportes y una bobina de una espira, por la que circula una corriente de radio frecuencia, rodea dicha columna. Esta bobina se desplaza verticalmente a lo largo de toda la columna de silicio y empieza a fundirlo del extremo inferior en la que hay una semilla cristalina como en el caso anterior, al subir lentamente provoca que la zona fundida del centro de la bobina vaya desplazándose hacia arriba, así, la zona fundida queda por debajo de la bobina y recristaliza siguiendo una estructura monocristalina, ésta queda entonces flotante entre dos zonas sólidas pero como el silicio tiene la propiedad de que los átomos de las impurezas prefieren la fase líquida a la sólida, el proceso de cristalización viene acompañado de otro de purificación, por eso este lingote monocristalino suele contener menos impurezas que el obtenido con el método Czochralski. Los cristales tipo zona flotante son mucho más costosos y de mayor pureza.



Fuente Imagen [29]

Una vez obtenido el Si-sc, por cualquiera de ambos procedimientos, se corta en pequeñas obleas. Cuanto más finas sean se necesitará menos cantidad de silicio para fabricar una célula, reduciendo así el coste. Por ello, la I+D está haciendo actualmente mucho hincapié en este aspecto, pasando de los 0,32mm en 2003 a 0,15 mm en 2010, y mejorando al mismo tiempo los rendimientos medios.

Después de producir la oblea, se requiere un proceso denominado decapado, mediante el cual se retiran los restos de material que se han originado en el corte y se mejora la superficie que puede presentar defectos o irregularidades (en este proceso se suele eliminar 0,01 mm de la oblea por ambas caras). A continuación de este proceso, para las células monocristalinas se procede al texturizado de la superficie que sirve para mejorar la absorción de la radiación solar que incide, luego se dopan con boro, fósforo u otros materiales las capas creando la unión p-n y más tarde se aplica una capa anti reflectante en la célula y se imprimen los contactos.

Como se pudo comprobar, los métodos de obtención de silicio monocristalino son más complejas que las del silicio policristalino, debido a los elevados costes y pérdidas de material en los procesos, se creó la tecnología de cinta "Ribbon technology" que produce capas finas de silicio cristalino mediante la extracción de

capas a partir de la fusión de silicio en polvo en un sustrato, éste método es mucho más económico porque se ahorra en pérdidas de material.

Conclusión de las células de Primera Generación:

Las células de c-Si ocupan el 90% del total producido y según el IEA 2008 se espera que se mantenga esta tendencia por lo menos hasta el año 2020, pero la escasez de silicio en el mercado por su utilización en la industria electrónica y el alto coste del proceso de fabricación, están impulsando el desarrollo de las células de lámina delgada, las de segunda generación (casi el 10% del total producido) y otras nuevas tecnologías, todavía en estado de I+D como son las de tercera generación.

3.5.2.2. Segunda Generación de Células Fotovoltaicas:

La segunda generación de células FV está dominada por las tecnologías “thin film” o en español “lámina delgada o de capa fina” [21], éstas constituyen casi un 10% de las ventas totales en todo el mundo. Se forman depositando capas muy finas de materiales (de muy pocos micrómetros) que son muy sensibles a la luz sobre soportes que tienen bajos costes como pueden ser el vidrio, acero inoxidable o plástico. Para realizar la unión entre las capas y el soporte se suelen utilizar las técnicas de deposición física, deposición química en fase vapor, electrodeposición o combinación de ambas, éstas técnicas son más económicas en cuanto a costes de producción que los materiales cristalinos y son aproximadamente como cien veces más finas que éstas, lo cual ahorra mucha materia prima en el proceso.

Actualmente esta tecnología se encuentra en investigación puesto que su principal objetivo es aumentar la eficiencia, aun así está comercializada y se pueden encontrar en aplicaciones como fachadas, techos solares y remplazo de vidrios.

Las principales células de lámina delgada son: las de silicio amorfo hidrogenado (a-si:H), Seleniuro de Cobre e Indio (CuInSe_2 o CIS), Diseleniuro de Cobre, Indio y Galio (Cu(InGa)Se_2 o CIGS), Teluro de Cadmio, HIT y de Arseniuro de Galio (GaAs que es la de mayor absorción).

SILICIO AMORFO HIDROGENADO (a-si:H) (Fuente [17])

El Si-a es un material que no tiene una estructura definida a lo largo de su red cristalina, lo que impide la formación de enlaces, pero si se deposita de forma que contenga algo de hidrógeno, se permitirá el movimiento de electrones a través del silicio. El método mediante el cual se realiza el silicio amorfo hidrogenado es el de deposición química en fase de vapor activada, éste proceso se hace con

temperaturas más bajas, menores costes y menor cantidad de materia prima que el silicio cristalino.

Este tipo de silicio tiene una gran capacidad de absorción de la luz, una lámina de 1 μm puede absorber el 90% de la energía que recibe. Por este motivo y los anteriores, se prevé que en un futuro se utilizaran mucho este tipo de paneles solares para aplicaciones en la edificación aunque también se suelen usar en pequeños dispositivos electrónicos como calculadoras, relojes, etc. Su aspecto físico es marrón homogéneo.



Fuente Imagen [30]

La potencia de estas células puede ser hasta de 150 Wp, los costes de inversión del sistema incluyendo montaje y componentes están entre USD/KWp 1.500 y 2.250, y los costos de operación y mantenimiento para esta tecnología son aproximadamente al 1% de la inversión [según la IEA 2010, Tech. Roadmap].

Ventajas:

- Su rendimiento máximo alcanzado en laboratorio ha sido del 13%.
- Tendencias de futuro hacia las aplicaciones de edificación.
- Bajo costo del material y del proceso productivo.
- Su proceso de fabricación es más simple que en los anteriores.
- Son eficientes bajo iluminación artificial.

Desventajas:

- Degradación debido a la luz durante las primeras semanas, luego se estabiliza la eficiencia.
- Valores de eficiencia menores que los de las células cristalinas.
- Presenta un alto grado de desorden en la red cristalina por ello, contiene un gran número de defectos estructurales y de enlaces.
- Su rendimiento supera el 10%, pero sigue siendo menor que el del si-c.

CELULAS CIS Y CIGS

Las células CIS están formadas por CuInSe_2 , fueron desarrolladas por la empresa Siemens Solar en 1994. Absorben una gran cantidad de luz, 99% en el primer micrómetro de material y son menos degradables que las de silicio amorfo, además tienen un rendimiento mayor.

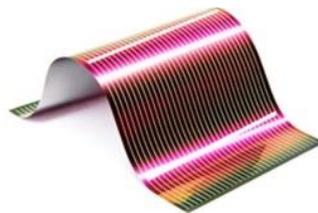
La eficiencia se puede aumentar todavía más si se las agrega pequeñas cantidades de Galio, así aparecieron las células CIGS que poseen cobre, indio, galio y selenio con la siguiente nomenclatura Cu(InGa)Se_2 .

Entre las células de lámina delgada, las que presentan mayor potencial debido a su alta eficiencia son las CIGS pues ofrecen una banda prohibida entre 1,02 eV y 1,68 eV, además del mayor coeficiente de absorción, también un 99% de fotones absorbidos. Se utilizan en aplicaciones de edificación.

Las células de silicio normales están formadas por una capa de contacto de Mo (Molibdeno), pero las CIGS por una fina capa de CdS o ZnS y una bicapa de aluminio y óxido de zinc, como TCO.

Actualmente, los expertos consideran que estos tipos de células, CIS y CIGS, son las opciones más prometedoras en un futuro, dentro de las de lámina delgada.

Estas células, pueden ser fabricadas de diferentes maneras: mediante técnicas de vacío tales como co-evaporación o sputtering, o mediante técnicas húmedas tales como electrodeposición o printing.



Fuente Imagen [31]

Ventajas

- Son más baratas (para cada módulo el proceso de unión de células está realizado con dispositivos de rayo láser, evitándose así el proceso de manipulado de cada célula como en los de silicio cristalino).
- La tecnología sputtering presenta numerosas ventajas cuando es trasladada a procesos industriales, ya que permite recubrir grandes áreas con procesos estables. Es apta para ser aplicada también sobre sustratos flexibles (por

ejemplo, metales o polímeros) permitiendo la utilización de procesos de fabricación roll to roll con altos rendimientos, lo que contribuye considerablemente a la disminución de costes y a poder integrar este tipo de células en la arquitectura (paredes y ventanas).

- Posee rendimientos en laboratorio próximos al 17% y en paneles comerciales del 9%.

Inconvenientes

- La utilización del indio produce unos costes elevados.
- La placa está compuesta por materiales altamente tóxicos (esto obliga a tener grandes medidas de seguridad en las plantas de fabricación).

TELURO DE CADMIO

La primera célula de telurio de cadmio (CdTe), fue desarrollada por la empresa BP Solar. Esta tecnología de láminas o película delgada son las competidoras de la CIGS debido a que sus costes de fabricación son bajos.

Este tipo de célula tiene un valor de banda prohibida de 1,49 eV con lo cual 1 μm puede absorber un 90% de la luz incidente, están formadas por una capa tipo p de CdTe unida a una fina capa tipo n de CdS (sulfuro de cadmio) y a otra capa final de TCO (SnO_2) que está conectada al contacto eléctrico.



Fuente Imagen [32]

Ventajas

- En laboratorios se ha conseguido construir celdas con eficiencias del 15,8 y 16% (la eficiencia máxima estimada es del 29% mientras que la máxima teórica para el Si es sólo del 20%).

- Su degradación es inferior a la del silicio amorfo.
- Se utiliza menos materia prima de cada material, puesto que el telurio de cadmio requiere cien veces menos material semiconductor que los módulos de silicio.

Inconvenientes

- Tiene una vida útil de 20 años solamente.
- El Cd es un material altamente tóxico (aunque la cantidad de Cd que puede tener un módulo de 0,1% en peso lo que supone entre 3 y 10 g/m²).
- Aunque el Cd se encuentra encapsulado puede ser un peligro para el medioambiente si no se recicla bien.
- El CdTe de tipo-p tiene muchas resistencias internas que pueden dar como resultado pequeñas pérdidas eléctricas.

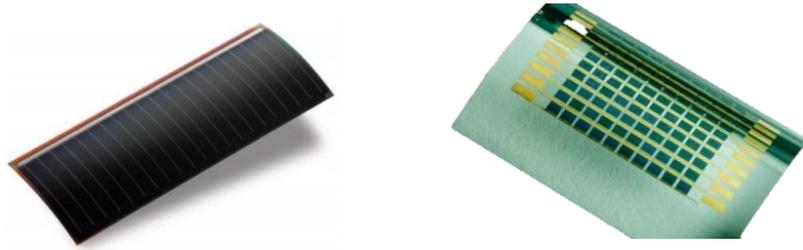
Debido a este último inconveniente, la investigación que se está desarrollando se está centrando en el estudio de las propiedades eléctricas (conductividad) y electrónicas de las láminas policristalinas de CdTe.

ARSENIURO DE GALIO (Fuente [17])

Este semiconductor GaAs, tiene aún un coeficiente de absorción de radiación solar más elevado debido a sus propiedades electrónicas y a que su banda prohibida está cerca de la ideal. La ordenación de su red cristalina se denomina estructura “zinc-blende” y es similar a la estructura del diamante y del silicio cristalino.

El compuesto se crea en un horno, en el cual se colocan por separado el Ga y el As a temperaturas distintas y el As en forma de vapor se transporta hacia el Ga formándose un material policristalino aunque éste puede ser luego transformado a monocristalino. Los dopantes utilizados para este compuesto suelen ser: Zn, Cd, Te, Se, S y Sn.

Esta tecnología tiene un gran interés comercial sobre todo para la fabricación de LED's y utilización en láseres semiconductores.



Fuentes Imagen [33]

Ventajas

- Se han alcanzado eficiencias superiores al 27% (utilizado este material en las células tándem (GaAs/GaSb) que se explicarán más adelante, se obtuvieron eficiencias del 35%.
- Necesita sólo unos pocos micrones de espesor para captar gran cantidad de energía pues su gap es directo y esta energía se capta en la superficie del dispositivo.
- Mantiene sus características a elevadas temperaturas.
- Presenta tolerancia a radiaciones ionizantes.

Inconvenientes

- Hay escasez de galio en la naturaleza, lo que aumenta los costes de obtención de materia prima.
- Toxicidad del arsénico involucrado en la fabricación.
- Elevado coste de producción.

HIT (Heterounión con capa delgada intrínseca) (Fuente [19])

Este tipo de célula está hecha por tener obleas de silicio monocristalino recubiertas de una capa muy delgada de silicio amorfo, son una mezcla entre las tecnologías cristalinas y las de lámina delgada.

Resisten temperaturas muy altas con lo que se produce mayor energía a igual potencia nominal. Por cada grado Celsius que se aumenta, el rendimiento solo

disminuye un 0,33 %, que es más bajo que el de silicio cristalino que era un 0,45%.

Su temperatura de fabricación es baja, de 200 grados Celsius, la cristalina era de 900 grados C, con lo que se ahorra en costes y energía. Se han llegado a eficiencias de 19%.

Conclusión de las células de Segunda Generación:

Como pequeño resumen de esta generación tenemos que los módulos de silicio amorfo son ideales para las aplicaciones de edificación pero su rendimiento máximo sigue siendo menor que los demás tipos de células de lámina delgada y las células cristalinas, sin embargo, las células CIS/CIGS y la de TeCd tienen una degradación menor que las de silicio amorfo y rendimientos mucho mejores con bajos costes, aunque tienen como inconveniente la toxicidad de sus materiales implicados, son las que los expertos estiman que tienen un gran futuro junto con las de GaAs que tienen como inconveniente los elevados costes pero son las de mayor eficiencia de conversión. Ésas últimas se están desarrollando en combinación en las células tándem que se explican más adelante y mediante las cuales se alcanzan factores de conversión de eficiencia muy grandes.

En definitiva, las CIGS son las que presentan un mayor potencial debido a su alta eficiencia y bajo coste.

También es importante decir que estas técnicas utilizan metales raros o mejor dicho poco comunes y que están en cantidades limitadas en la naturaleza, aunque las cantidades usadas en la fabricación son infinitesimales, un desarrollo masivo de módulos de estos tipos podría verse limitado por las cantidades de materia prima.

3.5.2.3. Tercera Generación de Células Fotovoltaicas:

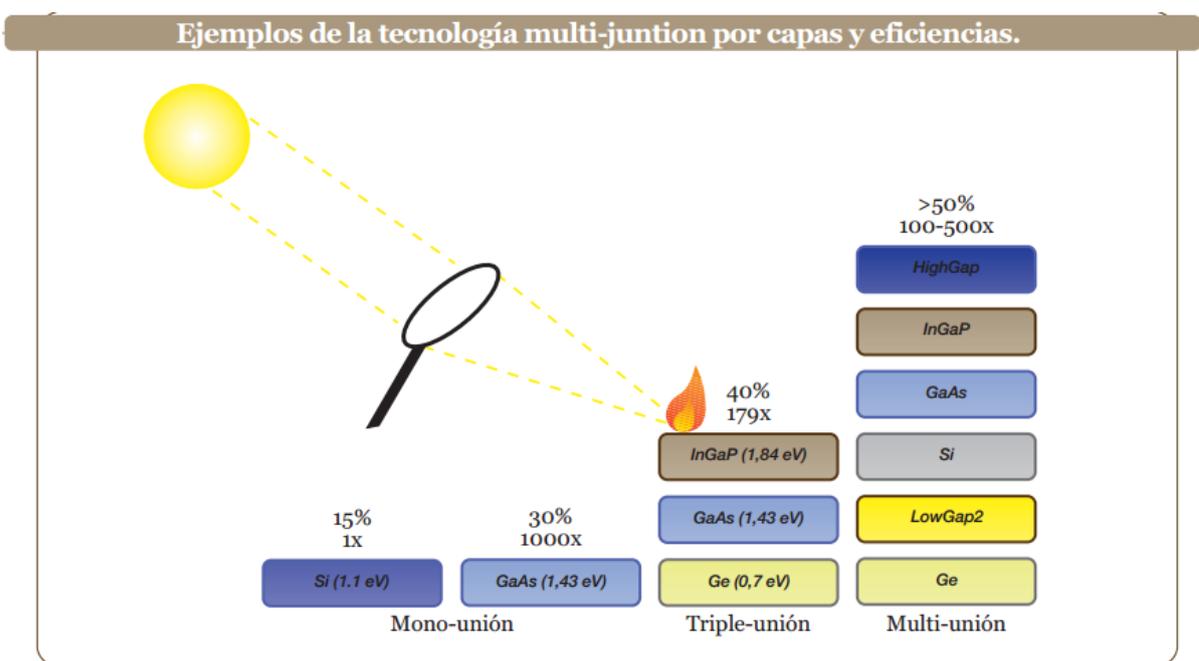
Entre las células de tercera generación se incluyen las células solares orgánicas (poliméricas), las células de Grätzel o DSSC (del inglés Dye-sensitised Solar Cell o células tintadas de colorante), las células de banda intermedia, de cristales fotónicos, de generación por múltiple excitación, células multiunión, células de tipo Tándem y células de concentración.

CELULAS MULTIUNIÓN (Fuente [17])

Primero llegaron las células “monounión” que están formadas por un único semiconductor con dos niveles de energía (como por ejemplo el silicio de las

células cristalinas), cuando en ellos actúa un fotón que no tiene energía suficiente para excitar el electrón del nivel más bajo al superior no aprovechan esa energía, y en caso contrario, cuando el fotón si tiene esa energía, sí que se excita el electrón pero la única energía que puede recuperar es la diferencia de energía de los dos niveles del semiconductor, el resto se pierde. Por esta razón, se están investigando las denominadas células solares multiunión. Las células multiunión están compuestas de varias capas delgadas, cada una de ellas constituida por un semiconductor diferente y con distintos espacios de banda, conectadas entre sí en serie mediante uniones.

La dirección de estas capas tiene que ser descendente dependiendo de su ancho de banda para así poder aprovechar toda la energía que se absorbe en cada región del espectro electromagnético de la radiación solar. De esta forma se logran eficiencias muy grandes como las que podemos ver en la siguiente imagen, cuantas más capas, más eficiencia tendrá la célula multiunión, aunque actualmente, se está trabajando con células de dos, tres y cuatro uniones solamente. Imagen: [15]



Fuente Imagen [34]

Este tipo de células fueron diseñadas para utilizarse principalmente en la industria espacial como por ejemplo para los satélites y vehículos de exploración espacial.

En EE.UU., Spectrolab ha llegado a producir células multiunión con una eficiencia del 38,8%. También, investigadores del Instituto Fraunhofer de Sistemas de Energía Solar (ISE), en Alemania, han conseguido obtener una eficiencia del 41,1% en células multiunión utilizando métodos de concentración de células que se

explicará más adelante, este supone un record europeo pues se ha concentrado 454 veces la radiación solar y se ha hecho que incida sobre células de 5mm² compuestas de GaInP/GaInAs/Ge. El germanio tiene una pequeña banda prohibida por lo que capta bien la radiación infrarroja, más del 80% de las células de este material semiconductor se utilizan en aplicaciones para satélites, su eficacia comercial suele estar entre el 30 - 35%, el inconveniente es que tiene elevados costes.

CÉLULA SOLAR SENSIBILIZADA POR COLORANTE

La célula solar sensibilizada por colorante (dye-sensitized solar cell, DSSC), también denominada célula de Grätzel, se introdujo en los años 90. Se encuentra formada por una capa mesoporosa constituida por una red de nanopartículas de óxidos semiconductores (TiO₂, ZnO, etc.). Adherida a este film nanocristalino se encuentra una monocapa de un colorante orgánico que tenga transferencia de carga. Los colorantes que se adhieren pueden ser sintéticos o naturales (pueden ser de distintos colores, utilizando pigmentos como la clorofila, la antocianina de la granada, o los carotenos del achiote una semilla muy popular de México. Tienen la ventaja de que la eficiencia aumenta con la temperatura, siendo la eficiencia normal del 11%. Estas células son muy flexibles.

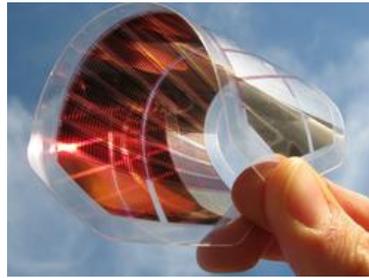


Fuente Imagen [35]

Suiza, EE.UU. y Australia están apostando con esta tecnología haciendo grandes inversiones (como las compañías Dyesol y Konarka).

CELULAS ORGÁNICAS

En el año 1986 se demostró por primera vez el efecto fotovoltaico sobre materiales orgánicos y unos años más tarde tuvo lugar la primera demostración de una célula fotovoltaica construida solamente con materiales poliméricos semiconductores.



Fuente Imagen [36]

Hoy en día, esta tecnología es la más utilizada dentro de las células orgánicas. Se basa en macromoléculas orgánicas derivadas de la industria petroquímica y se encuentran en fase experimental.

Ventajas

- Durabilidad, eficiencia y precio.
- Los materiales que utiliza son baratos y no están sometidos a posible escasez.
- No necesitan la incidencia directa del sol, son bastante insensibles al ángulo de llegada de la luz.
- Proceso de fabricación más barato.
- Aplicaciones más versátiles debido a que el resultado son células: ultrafinas, ligeras, flexibles y transparentes que pueden tener uso en las edificaciones.

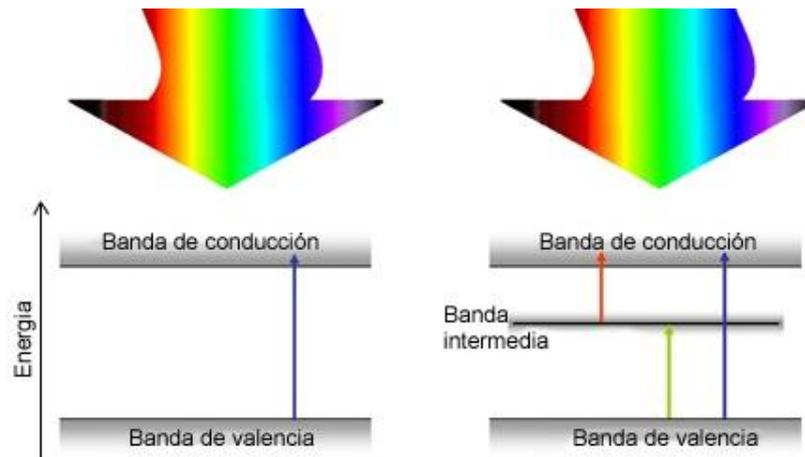
Inconvenientes

- Baja eficiencia respecto a las células de silicio. El record de eficiencia de este tipo de células actualmente es del 11 por ello se están realizando investigaciones con carboxifitalocianinas de cinc sobre superficies de TiO_2 y células en las que el electrolito I_3^-/I^- ha sido reemplazado por polímeros conjugados iónicos o por moléculas de cristal líquido para aumentar la misma.
- Tienen un tiempo de vida limitado por la degradación de los polímeros cuando son expuestos a la luz del sol.

CÉLULAS CON MATERIALES DE BANDA INTERMEDIA

Esta célula solar fue propuesta en 1997 por miembros del Instituto de Energía Solar. Este tipo de células junto con las de tipo orgánico son, según los expertos, unas de las más prometedoras para un futuro exitoso de la energía fotovoltaica debido a que en los últimos años han tomado gran importancia.

Se basan en un semiconductor básico que se caracteriza por la presencia de una banda intermedia (BI), parcialmente ocupada entre la banda de conducción (BC) y la banda de valencia (BV). En este caso, además de que se absorben los fotones mediante transiciones desde la BV a la BC, los fotones de menor energía pueden hacer saltar los electrones entre dichas bandas dando lugar a la conversión entre energía lumínica a electricidad.



Fuente Imagen [37]

Ventaja

La eficiencia óptima que se puede llegar a conseguir en células solares de banda intermedia está en torno al 63%, frente al 22% conseguido actualmente para una célula solar de silicio.

Inconveniente

El problema de estas células era conseguir materiales que reúnan en una sola célula los tres tipos de bandas. Una forma de lograr esto es mediante la tecnología de los puntos cuánticos (QDs, del inglés Quantum Dots) donde un punto cuántico es una estructura cristalina con dimensiones en la escala de nanómetros. El IES en colaboración con la Universidad de Glasgow (en el marco del Proyecto Integrado FULLSPECTRUM) ha fabricado células de banda intermedia usando puntos cuánticos de AsIn en una matriz de AsGa, pero el rendimiento aún es muy bajo.

CÉLULAS DE GENERACIÓN POR MÚLTIPLE EXCITACIÓN (MEG)

Las células solares denominadas de “generación por múltiple excitación (MEG, Multiple Exciton Generation)” son un nuevo concepto. Esta tecnología se basa en la formación de más de un electrón por fotón absorbido de manera que parte de

la energía que se pierde en las células solares de hoy se convierta en más electricidad. Los investigadores creían hasta hace poco que el efecto MEG solo ocurría en nanocristales de materiales semiconductores, sin embargo en el año 2008, investigadores del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (National Renewable Energy Laboratory, NREL, en colaboración con Innovalight, anunciaron que el efecto MEG tiene lugar de forma eficaz, también en los nanocristales de silicio. Esto puede resultar en un avance para la eficiencia de conversión en las células solares basadas en silicio.

CÉLULAS CON CRISTALES FOTÓNICOS

Los cristales fotónicos son estructuras con banda prohibida para fotones (photonic band gap, PBG) que están constituidas por variaciones periódicas en el índice de refracción del material que las constituye. Estas bandas se pueden diseñar dependiendo de si quieres impedir o favorecer la propagación de fotones con determinadas energías.

Desde hace tiempo estos cristales, que se pueden modificar para reflejar y difractar todos los fotones dentro de unas longitudes de onda específicas, fueron muy importantes para el sector de telecomunicaciones en las comunicaciones ópticas.

En la actualidad, los nuevos procesos de fabricación hacen que resulten prácticos en aplicaciones a mayor escala donde tienen el mismo coste que las células convencionales con la ventaja de necesitar menos material semiconductor. Los investigadores del MIT están trabajando la parte de atrás de las células donde combina en este un reflector con un antirreflectivo de la parte frontal, todo ello para capturar mejor la radiación incidente roja e infrarroja del silicio para las células de silicio basadas en cristales fotónicos.

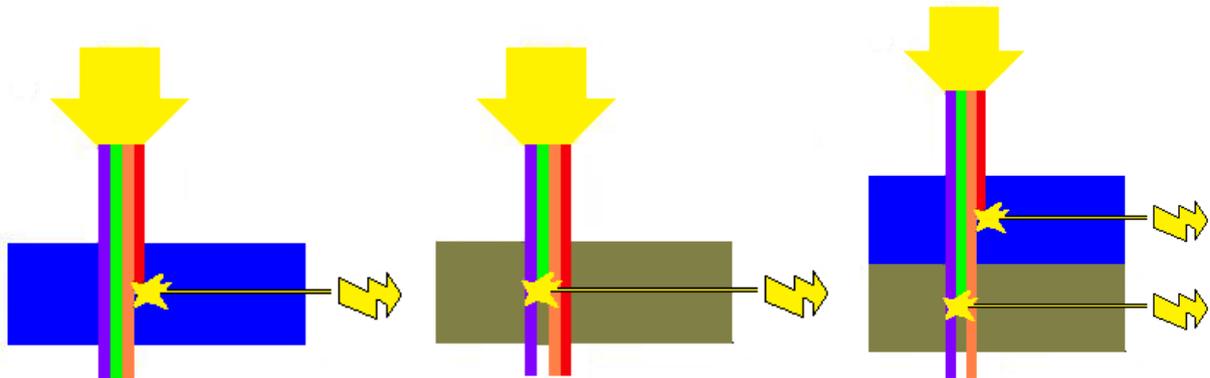
En el Instituto de Microelectrónica de Madrid –IMM- fabrican cristales fotónicos en materiales semiconductores III-V, como GaAs e InP y sus aleaciones. En 2008, este grupo del CSIC ha patentado un nuevo tipo de célula solar con eficiencia de hasta un 30%, superior a las células solares convencionales.

PANELES SOLARES TIPO TÁNDEM

Estos paneles combinan dos tipos de células individuales y con ello, dos tipos de materiales semiconductores distintos. Como por ejemplo capa delgada de silicio amorfo sobre silicio cristalino, que absorben el espectro al mismo tiempo y se solapan, mejorando el rendimiento en comparación con las células individuales separadas, ya sean amorfas, cristalinas o microcristalinas.

Esto se debe a que cada tipo de material trabaja en una parte del espectro electromagnético de la radiación solar y con la utilización de dos o tres tipos de materiales se pueden aprovechar desde la radiación ultravioleta hasta las ondas visibles e infrarrojas del espectro.

Con este tipo de paneles se ha alcanzado rendimientos del 35% y en teoría, con la unión de tres se podría alcanzar un rendimiento del 50%.



(Material semic 1 y Material semic 2, por separado)

Célula Tandem

(1) Célula con material semiconductor 1, solo aprovecha una parte del espectro electromagnético de que está compuesta la luz solar.

(2) La célula con el material semiconductor 2 aprovecha otra parte del espectro electromagnético de la luz diferente al del material semiconductor 1.

(3) En la célula Tandem (Material semiconductor 1 + 2) se combinan ambos tipos de materiales, con lo que se aprovecha la parte del espectro electromagnético de ambos tipos de materiales son capaces de transformar en energía eléctrica. El rendimiento total será en teoría la suma de los rendimientos de ambos tipos de células por separado.

Fuente: Los paneles solares fotovoltaicos – Pág. <http://www.sitiosolar.com>

Ventaja

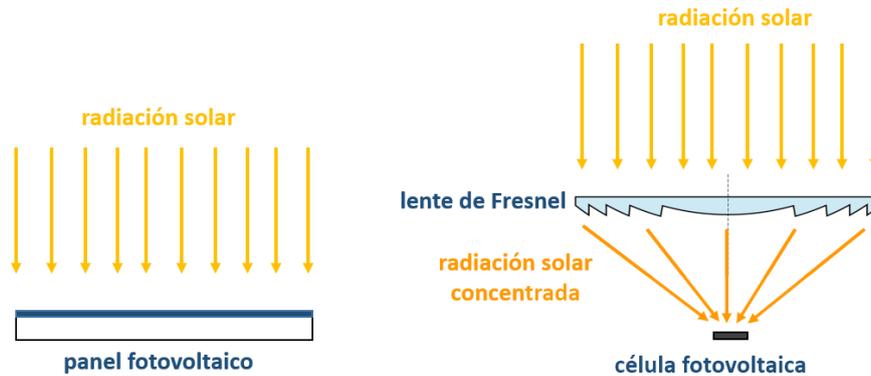
- Alta sensibilidad en un amplio rango de longitudes de onda.
- Excelente rendimiento.

Inconveniente

- El costo es alto debido a la superposición de dos células.

CÉLULAS DE CONCENTRACIÓN (CPV) (Fuente [20] y [29]):

Esta tecnología consiste en concentrar la luz solar mediante dispositivos ópticos como lentes (de Fresnel) o espejos, reduciendo de esa manera el área empleada en las células y/o en los módulos que las albergan, aumentando así su eficiencia.



Fuente Imagen [38]

La característica más importante de esta tecnología es su nivel de eficiencia, que consigue ratios de más de un 30%. Además se puede equipar la pequeña superficie con un material fabricado de semiconductores de compuesto III-V (del tipo Arseniuro de galio multi-junction), con lo se alcanzan rendimientos de entre 35%-40%.

La CPV presenta fundamentalmente 2 desventajas:

- Necesidad de emplear seguidores pues sólo se puede aprovechar la radiación solar que llega de forma directa. El seguidor es un sistema que permite al módulo seguir la órbita solar. Sin el empleo de estos seguidores la eficiencia cae mucho y no resultan rentables. Esta necesidad hace que las células de CPV sean poco rentables para tejados o integración en edificios, pero altamente eficientes para instalaciones en suelo.
- Las altas temperaturas que se generan como consecuencia de la concentración. Este problema se soluciona actualmente utilizando difusores de calor de aluminio o cobre.

Elementos básicos característicos de los sistemas CPV:

Los módulos CPV utilizan por lo general células fotovoltaicas multiunión. Estas células ya mencionadas anteriormente eran varias células solares conectadas en

serie y hechas de materiales semiconductores distintos. La ventaja que permite esta configuración es que permite un mejor aprovechamiento de las energías de los fotones presentes en el espectro solar. Las lentes que se suelen utilizar para aumentar la densidad de energía incidente sobre la célula pueden ser tanto reflexivas (espejos) como refractivas (lentes de *Fresnel*), a estos elementos los denominamos por lo general “primario”. También se suele dotar adicionalmente al sistema de un segundo elemento óptico (“secundario” o SOE) que se coloca adherido o próximo a la célula y cuya misión principal es aumentar la captación angular del conjunto a la vez que asegurar una distribución uniforme de la energía incidente en la célula que evite la sistemas CPV únicamente aprovechan el recurso solar proveniente de la radiación solar directa (la más energética), lo que obliga a que los módulos deban ser instalados en estructuras de seguimiento de doble eje.



“Seguidor de doble eje y dispositivo de seguimiento con gran carga de módulos CPV”

(Fuente [29])

Conclusión de las células de Tercera Generación:

En esta generación lo que se persigue es aumentar la eficiencia combinando varios tipos de células y materiales (multiunión, tándem u orgánicas) en serie para poder captar todas las longitudes de onda de la radiación solar, así como intentar concentrar la mayor cantidad de la misma en menos área (células de concentración), éstas últimas están teniendo un gran auge en la actualidad y se prevé que siga la tendencia en un futuro.

3.5.2.4. Cuarta Generación de Células Fotovoltaicas:

Actualmente, todas las tecnologías anteriores se siguen investigando para mejorarlas poco a poco, pero en generaciones futuras se estima que vendrá una

cuarta generación en la cual se mezclaran nanopartículas (nanocristales) con polímeros para formar una capa simple multiespectral y luego se montará una capa sobre otra para fabricar celdas solares multiespectrales definitivas que serán más baratas y eficientes.



Fuente Imagen [39]

También se está investigando un material que puede llegar a ser muy importante, como es el grafeno que tiene propiedades extraordinarias de conducción, térmicas, electrónicas y eléctricas, así como para captar la luz en paneles solares, pero a grandes rasgos, la nanotecnología será el pilar fundamental para hacer que la energía solar fotovoltaica sea competitiva.

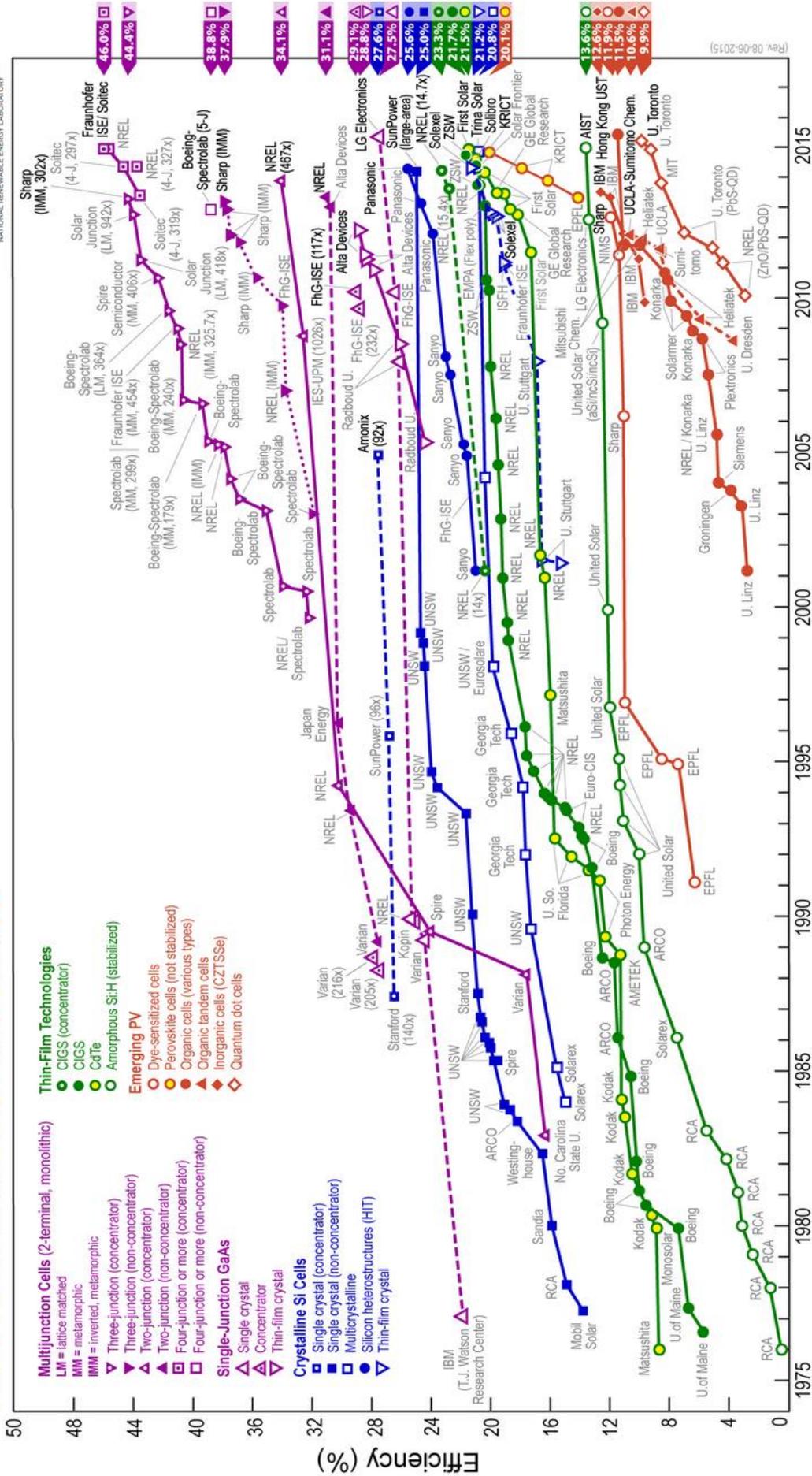
3.5.2.5. Resumen de las Eficiencias en Celdas Fotovoltaicas hasta la Actualidad

En definitiva, durante todas las generaciones se ha buscado reducir los costes de producción pues los métodos que hay hasta el momento son bastante caros y difíciles de realizar y también reducir los costes de obtención de materia prima ya que la mayoría de esos materiales son escasos en la Tierra, además del principal objetivo, aumentar la eficiencia de conversión de luz en electricidad.

Para uso normal, las células monocristalinas son las más eficientes, seguidas por las cristalinas, pues éstas pueden llegar a eficiencias del 15-20%, sin embargo los paneles amorfos y de capa fina no suelen superar el 10%, solamente se construyen de mayores eficiencias para aplicaciones espaciales como los satélites de GaAs o de células multiunión que llegan a eficiencias del 30-40%. Aunque con todos estos avances en la tecnología en todos estos años se han conseguido reducir algunos costes, todavía queda la incertidumbre de si éstas nuevas células duraran lo mismo que las ya existentes de silicio, lo cual juega muy a favor de éste último y por ese motivo se estima que se seguirá utilizando como mínimo hasta los años 2020-2030.

Podemos ver las comparaciones de las eficiencias de todas las tecnologías en el siguiente gráfico obtenido de la fuente National Renewable Energy Laboratory, NREL [9]:

Best Research-Cell Efficiencies



(Rev. 08/06/2015)



4. JUSTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES ELEGIDOS PARA EL MODELO

Como hemos podido ver en los apartados anteriores, un sistema fotovoltaico tiene muchos elementos que están fabricados de diversos materiales, tenemos desde las baterías o los inversores hasta los distintos tipos de semiconductores y dopantes que se utilizan en los módulos fotovoltaicos. Llegados a este punto, haremos un breve repaso de los materiales que necesita un sistema FV y cada tipo de célula para escoger los más relevantes para el estudio posterior.

En cuanto a los componentes del sistema, tenemos como materiales relevantes los del aluminio que soporta toda la estructura del panel fotovoltaico (además de recubrir el módulo), el vidrio o tedlar puesto que se requiere una capa en la superficie de todos los módulos, el cobre que se necesita como material conductor de la electricidad que generan las placas, el EVA que se utiliza como encapsulante de las células dentro del módulo y las baterías de “plomo-ácido” (el 90% del mercado de éstas corresponde a este tipo). Los porcentajes aproximados de cantidad de material en un panel suelen ser: el 10 por ciento de aluminio, el 75 de vidrio, el 2 por ciento silicio, y el 0,5 por ciento cobre. Para nuestro estudio se cogerían el aluminio, el vidrio y el cobre puesto que son los de mayor importancia a nivel comercial y al utilizarse en varias aplicaciones en la industria, podrían llegar a acabarse en un futuro, sin embargo, como lo que se pretende es prever qué tipos de células seguirán siendo utilizadas en un futuro y éstas dependen más de los materiales semiconductores utilizados, en un principio el aluminio y vidrio no se estudiarán pues son comunes a todas ellas, sin embargo el cobre si pues se utiliza en las células CIS y CIGS.

Como hemos visto, las células cristalinas (policristalinas y monocristalinas) se realizan con **silicio**, ocupan el 90% del total producido a nivel mundial y se espera que la tendencia siga siendo así hasta el 2020, aunque debido a la escasez de silicio fotovoltaico en el mercado (la mayoría es silicio para la industria electrónica) y a que es la tecnología más fiable hasta el momento (dura más de 25 años), se ha elegido para el estudio posterior por la necesidad que hay de saber qué pasará con este tipo de células en un futuro.

De entre las células de lámina delgada tenemos que las de silicio amorfo hidrogenado (a-si:H) utilizan silicio e hidrógeno, el silicio ya se ha justificado su elección, sin embargo del hidrógeno cabe decir que no se va a realizar su estudio puesto que es utilizado en pequeñas cantidades.

Las células con Seleniuro de Cobre e Indio (CuInSe_2 o CIS) y Diseleniuro de Cobre, Indio y Galio (Cu(InGa)Se_2 o CIGS), vemos que están formadas por cobre, indio,

selenio, galio y están cubiertas por una capa fina de CdS o ZnS y una bicapa de aluminio y óxido de zinc, como TCO, por lo tanto utilizan también cadmio, zinc y azufre. Para este tipo de células se estima que tendrán un gran futuro próximo, con lo que se procederá al estudio de sus principales materiales: **Indio, Selenio, Galio y Cobre** (el cobre, como vemos, se utiliza integrado en las células, además de para el cableado, con lo que definitivamente se utilizará porque es importante introducirlo en el estudio).

Las células realizadas con telurio de cadmio, están formadas por una capa tipo p de CdTe unida a una fina capa tipo n de CdS (sulfuro de cadmio) y a otra capa final de TCO (SnO_2) que está conectada al contacto eléctrico. Es importante decir que tratándolas con una solución de Cloruro de Cadmio se consiguen células de alta eficiencia. El problema es que el cloruro de cadmio es un compuesto altamente tóxico, puede causar enfermedades y si alcanza el ciclo del agua puede contaminar la fauna acuática durante generaciones, además es un material muy caro. Para solucionar este problema, se ha probado a rociar las células solares con cloruro de magnesio. La eficiencia se mantenía y era un material completamente inocuo, es una molécula química muy barata increíblemente fácil de conseguir a partir de agua de mar pero todavía está en fase de experimentación, con lo cual los materiales relevantes a estudiar en este tipo de célula serán el **Cadmio** y el **Telurio**.

Respecto a la célula de tipo Arseniuro de Galio (GaAs que es una de las que tiene mayor absorción), se utilizan el Ga y el As junto con dopantes que suelen ser: Zn, Cd, Te, Se, S y Sn. También las células cristalinas suelen estar dopadas de fósforo o boro, pero todos estos dopantes no se van a considerar en el estudio por utilizarse en cantidades muy pequeñas y haber otros materiales de más relevancia que éstos que se usan en mayor cantidad como el Galio que ya se justificó su relevancia y ahora se vuelve a justificar y el **Arsénico** el cual ha sido elegido para el estudio, además algunos de esos dopantes ya se han introducido en el estudio como materiales semiconductores principales.

De las células solares orgánicas (poliméricas), no se escogerá ningún material en concreto para el estudio posterior puesto que los materiales poliméricos semiconductores están todavía en fase de investigación. Las células de Grätzel o DSSC (del inglés Dye-sensitised Solar Cell o células tintadas de colorante), estaban constituidas por una capa mesoporosa formada por una red de nanopartículas de óxidos semiconductores (TiO_2 , ZnO, etc.). Adherida a este film nanocristalino se encontraba una monocapa de un colorante orgánico que tenga transferencia de carga. Para la fabricación de células con cristales fotónicos se utilizan materiales semiconductores III-V, como GaAs e InP y sus aleaciones, así como para las células de banda intermedia se usan puntos cuánticos de AsIn en una matriz de AsGa,

éstos materiales ya han sido justificados para el estudio, con esto se reitera su importancia pues se utilizan en todos estos tipos de células que se están investigando.

Respecto a las células multiunión, éstas pueden estar formadas por varios elementos, pero las más comunes suelen estar formadas por:

- Una subcélula superior de GaInP + una célula intermedia de GaInAs + una célula inferior de Germanio.
- Una capa de highGap + capa de InGaP + capa de GaAs + capa de Silicio + LowGAP + capa de Germanio.

También una célula tipo tándem muy famosa es la GaAs/GaSb pero las hay más complejas como la de triple juntura de *GaInP₂/GaAs/Ge* y *GaInP₂/InGaAs₂/Ge* [17].

Como se puede ver, los materiales de estas últimas líneas ya se encuentran apuntados para nuestro estudio debido a su importancia, la única que no está es el Germanio pero no se ha incluido en el estudio debido a que se utiliza en menor cantidad. En el estudio nos centraremos en los materiales de los módulos de silicio, TeCd, Ga As y los CIGS que son los que más se están fabricando en este momento.

En la tecnología de concentración fotovoltaica se suelen utilizar lentes de fresnel o espejos de cristal junto con pequeñas células de GaAs o multiunión, pero este tipo de lentes no entrarán en el estudio por ser más relevantes las pequeñas células que utilizan pues usan materiales más escasos que los cristales de las lentes.

En cuanto a la cuarta generación de células, que son las realizadas con nanopartículas, nanocristales o polímeros para formar capas solares multiespectrales, diremos que tampoco entrarán en el estudio que vamos a realizar puesto que están en fase de experimentación e investigación y no se obtendrían datos ni siquiera aproximados para el modelo.

A continuación tenemos una tabla con datos sobre la abundancia de los elementos anteriormente citados en la corteza terrestre y que se utilizan en los módulos:

Elemento	Abundancia (ppm)
Si	227.000
Ga	15
As	1,5
Te	0,005
Cd	0,11

In	0,049
Se	0,05
Cu	50

Fuentes [34] y [17]: Universidad General de Energía de San Martín.
<http://www.tandar.cnea.gov.ar/doctorado/Tesis/MartinezBogado.pdf>

Aunque todos estos materiales se utilicen en pequeñas cantidades, si se utilizaran de forma masiva se podrían acabar en un futuro dependiendo de los tipos de células que más se vayan a utilizar, por ello se realiza este posterior estudio sobre los siguientes materiales, que son los escogidos debido a su mayor importancia:

Silicio (Si)	Indio (In)	Cobre (Cu)	Selenio (Se)
Galio (Ga)	Arsénico (As)	Teluro (Te)	Cadmio (Cd)

5. INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA DE SISTEMAS CON EL SOFTWARE VENSIM

5.1. LA DINÁMICA DE SISTEMAS:

La Dinámica de Sistemas es una metodología o herramienta de construcción de modelos de simulación muy diferente al de otras técnicas utilizadas en otros estudios (como por ejemplo la econometría).

Su propósito es, extraer la lógica interna del modelo y con ello llegar a comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema complejo a largo plazo mediante: diagramas con variables, relaciones dinámicas, realimentaciones, retardos, relaciones causa-efecto. Y una vez comprendido el comportamiento, se puede simular su influencia y sensibilidad para unas decisiones futuras (óptimas), resolver problemas o prever escenarios futuros.

De este modo, se deberán estudiar cómo las distintas acciones efectuadas sobre las partes del sistema, influyen positivamente o negativamente en las tendencias de comportamiento que lleva implícito el mismo. Para ello se suelen utilizar software que ayudan a implementar los diagramas para realizar la simulación, como puede ser el Software “VenSim Ple” utilizado en este proyecto.

También, *“Es importante señalar la diferencia existente entre dos clases de modelos, los modelos de predicción pretenden suministrar datos precisos acerca de la situación futura del sistema modelado. Por otra parte, los modelos de gestión pretenden básicamente establecer que la alternativa x es mejor que la alternativa y; en estos modelos no existe necesidad de tanta precisión ya que las comparaciones son igualmente útiles. La Dinámica de Sistemas elabora modelos de esta segunda clase.”*

Libro: Dinámica de Sistemas de Juan Martín. 2003.

Así vemos que en este caso el ajuste del modelo a los datos históricos ocupa un lugar secundario, sin embargo son importantes para un correcto análisis del sistema futuro, que deberá ser lo suficientemente amplió el intervalo de tiempo para que se puedan ver claramente las tendencias futuras. La evolución a largo plazo podrá ser comprendida sólo si se identifican las principales causas de los posibles cambios, esto depende de una selección correcta de las distintas variables y límites que forman el sistema las cuales deberán incluir toda la información que sea necesaria para el sistema y el intervalo de tiempo utilizado.

Hay multitud de campos en los que se pueden desarrollar modelos dinámicos, algunos de ellos son en los temas relacionados con: la Organización Industrial, el Medioambiente, la Política económica y sectorial, Gestión urbana y del territorio, Gestión administrativa, Psicología, Economía, Educación e Ingeniería (siendo éste último del que trata este proyecto).

5.2. EL SOFTWARE VENSIM PLE (Fuente [11]):

El software utilizado concretamente en este proyecto es el “**Vensim PLE**”, una versión básica con amplias y potentes prestaciones diseñadas para modelos de simulación basados en la metodología de la dinámica de sistemas y el system thinking.

Con este programa se pueden reproducir modelos de simulación de entornos muy diversos que no estén (o sí) relacionados, como anteriormente se explicó pueden ser desde sistemas empresariales a sistemas medioambientales con diferentes plazos de tiempo y políticas que se desean implantar.

Los requerimientos del sistema para instalarlo son: Entorno Windows (95/98/Millennium/NT/2000/XP/Vista) o en Power Macintosh version System 7 o superior (en la versión Classic bajo OSX), 8 MB de memoria y 8 MB de espacio en disco para su funcionamiento.

Destaca por disponer de:

- Iconos, menús y cuadros de diálogo claros.
- Herramientas para crear el diagrama causal y diagrama de flujos.



Fuente: Elaboración propia

- Se pueden personalizar los diagramas con diferentes colores, tipos de letra, símbolos, flechas y conexiones.
- Se pueden crear múltiples vistas o páginas de un modelo donde cada vista contiene una parte o segmento de la estructura total del modelo que pueden estar conectadas entre sí.
- El editor de ecuaciones ayuda a definir las ecuaciones del modelo de simulación.
- Permite crear y simular modelos con cientos de miles de variables.
- Contiene muchas funciones incorporadas definidas por el usuario, incluyendo búsquedas, patrones de prueba de entrada, operadores lógicos, generadores de números aleatorios, retrasos continuos y discretos...
- Gran rapidez de simulación y que además permite el uso de grandes bases de datos.
- Se pueden crear datos externos en los editores de texto, o importar desde (o exportar a) las aplicaciones de bases de datos y hojas de cálculo.

5.3.ETAPAS EN EL MODELADO CON DINÁMICA DE SISTEMAS [13]

1. Identificar el problema ¿Cuál es el problema? ¿Por qué es un problema?

Lo primero de todo es identificar el problema con claridad, y describir los objetivos del estudio con precisión. La definición correcta del problema real es muy importante pues todas las demás etapas estarán condicionadas a ello. También en este paso sería bueno hacerse una idea sobre cuánto tiempo y dinero va a costar sacar el modelo y del horizonte temporal que se considerará para la simulación.

En este caso, el principal problema es la escasez de recursos minerales que existe sobre los principales materiales utilizados en la industria solar fotovoltaica, esto puede llegar a ser una limitación de este tipo de energía solar en un futuro.

2. Definir el sistema ¿Qué es un Sistema?

Un sistema es un conjunto de "elementos" que se relacionan entre sí, de forma que si un elemento cambia, puede que todos los demás elementos se vean afectados por éste. Los elementos pueden estar relacionados directa o indirectamente con el

problema y sólo aquellos que afecten de esta forma son los que formaran el sistema mediante las relaciones que tengan.

En este proyecto el sistema considerado será el sector fotovoltaico implementado para cada tipo de material elegido anteriormente, el sistema constará de variables relacionadas con las reservas de material, su extracción, producción, reciclaje y los costes que todo esto conlleva, así como variables en las que se pueda ver la evolución de potencia máxima instalada en un futuro sin limitación del material.

3. Las fronteras del sistema ¿Dónde acaba el Sistema?

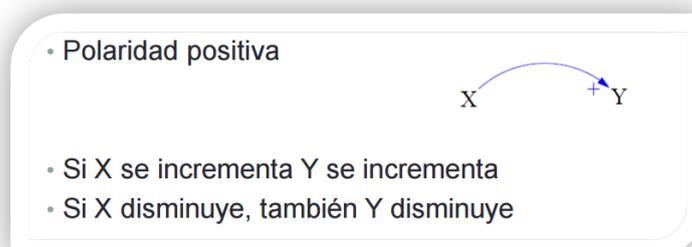
El sistema debe de contener el menor número de elementos (variables) posible, que nos permita realizar una simulación real con la que poder realizar un estudio, solucionar el problema o realizar una toma de decisión respecto al tema. Es por ello que el modelo según se va construyendo, pasa por varias fases de ampliación o simplificación de elementos hasta el final, porque se irá viendo cuáles de ellos aportan información relevante y cuáles no.

Lo recomendable es que el tamaño del modelo sea tal que se puedan explicar sus elementos principales en 10 minutos, si ese tiempo es superior llevará al fracaso.

4. Formulación de hipótesis sobre el sistema y su dinámica. Diagrama Causal ¿Cómo representamos un Sistema?

Una vez que se tienen en un papel los elementos relevantes que influyen directa e indirectamente en el sistema, se realiza el denominado “Diagrama Causal” que es por tanto, un diagrama que recoge los elementos clave del Sistema y las relaciones entre ellos de forma más gráfica mediante flechas entre cada elemento.

Esas flechas se acompañan de un signo (+ o -) que indica el tipo de influencia ejercida por una variable sobre la otra.



Fuente: Elaboración propia

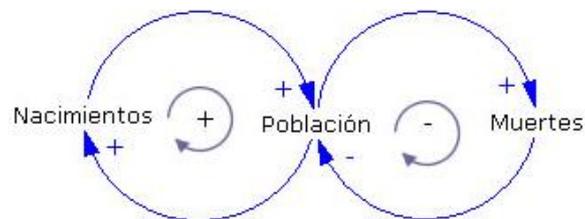
- Polaridad negativa



- Si X se incrementa, Y disminuye
- Si X disminuye, Y se incrementa

Fuente: Elaboración propia

Un ejemplo de diagrama causal sería:



Fuente: Elaboración propia

En este diagrama anterior podemos ver también los llamados “bucles de realimentación o feedback” [10], que son cadenas cerradas de relaciones causales, las cuales pueden ser de “realimentación positiva” (en el ejemplo es el de la izquierda, en el cual el número de relaciones negativas es par, además al aumentar la población aumenta el número de nacimientos a la larga y viceversa), de “realimentación negativa” (en el ejemplo es el de la derecha, en el cual el número de relaciones negativas es impar, es una semejanza a ir multiplicando los signos dentro del bucle, además quiere decir que al aumentar el número de muertes disminuye la población y viceversa), también puede haber bucles combinados que tengan ambos unos dentro de otros.

Los bucles negativos suelen estabilizar el sistema porque van restando a éste valores, lo que hace que no se disparen. Suelen actuar también como limitadores. Sin embargo los bucles positivos llevan a sistemas inestables, todo ello independientemente de la situación de partida.

En la actualidad, casi todos los modelos llevan miles de bucles combinados, con lo que el comportamiento final dependerá de qué bucle es dominante en cada momento de la simulación, no es evidente.

En el diagrama siempre suele haber un único **elemento limitativo** [10], que es aquel elemento dinámico que limita el crecimiento del sistema. En nuestro caso de los

paneles solares fotovoltaicos, lo veremos más adelante, pero seguramente el elemento limitativo sea la escasez de materiales a largo plazo para construir los módulos FV, dicho de otro modo, las reservas de cada material elegido.

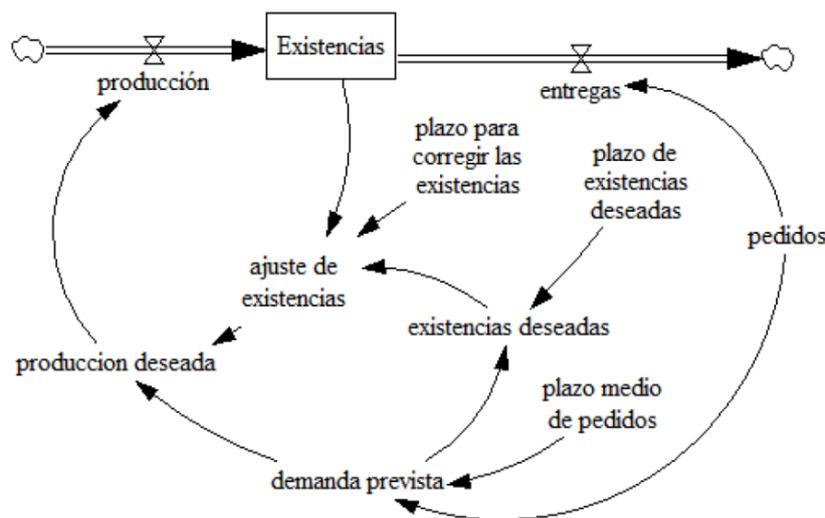
También se pueden encontrar los **elementos clave “leverage-points”**, que son elementos de gran influencia para el sistema, suelen existir varios y no suelen variar a lo largo del tiempo. Originan grandes cambios en la solución con un esfuerzo mínimo (por ejemplo cambiando un solo dato de un elemento clave, la simulación puede llegar a dispararse y desencadenar un comportamiento inestable del sistema).

Encontrar estos puntos no es tarea fácil pues no se ven con la simple observación del modelo y puesto que no existen unas reglas fijas para obtenerlos, se deberán de realizar análisis de sensibilidad explicados más adelante.

5. Proceso de modelado en VenSim Ple para posterior simulación. Diagrama de flujos.

Una vez que se tiene el diagrama causal bien definido, se procede a implementarlo en el programa VenSim Ple mediante el Diagrama de Flujos, también denominado Diagrama de Forrester, que es una traducción del Diagrama Causal a una terminología que permite la escritura de las ecuaciones en el ordenador para así poder validar el modelo, observar la evolución temporal de las variables y hacer análisis de sensibilidad.

Un ejemplo de este diagrama de flujos podría ser:



Libro: *Dinámica de Sistemas* de Juan Martín. 2003.

Todos los elementos que se ven en la imagen, en el diagrama causal eran simples elementos, elementos clave o incluso elementos limitativos, los cuales estaban relacionados unos entre otros, pero ahora cada elemento tendrá sus características, se explica a continuación el cambio de “elemento” a “variable auxiliar”, “variable stock”, “flujo” o “retardo”:

VARIABLES STOCKS: Son variables de estado, memoria o almacén. Variables dinámicas (dependen del tiempo). Se representan en VenSim como una caja donde está dentro su nombre.



Fuente: Elaboración propia

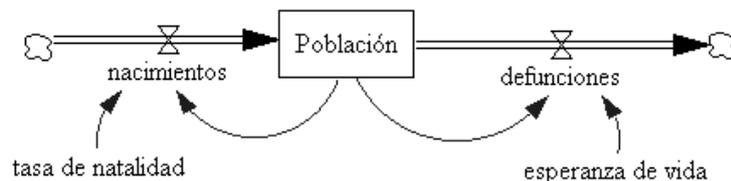
VARIABLES FLUJOS: Son variables que producen la variación de los stocks, pueden ser positivas (incrementar el stock) o negativas (disminuir el stock).



Fuente: Elaboración propia

En este ejemplo, su flujo positivo serían los nacimientos y el negativo las muertes, su relación con la variable stock sería \rightarrow Variación de Población = Nacimientos - Muertes

VARIABLES AUXILIARES: El resto de variables o constantes que aparecen en un modelo son variables auxiliares, éstas se relacionan entre ellas y con las variables de flujo y stock a través de funciones.



Fuente: Elaboración propia

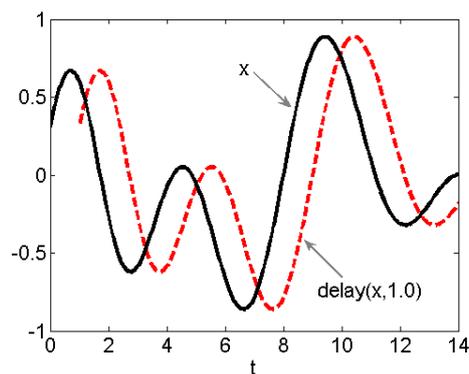
Pueden ser constantes, conversores de unidades, variables que dependen de otras variables, variables que dependen del tiempo, parámetros estimados, etc.

En los modelos grandes suele haber siempre muchas más variables auxiliares que de flujo o stock.

En este ejemplo las variables auxiliares son tasa de natalidad y esperanza de vida.

Las variables a su vez pueden ser, exógenas o endógenas. Las exógenas vienen determinadas fuera del modelo, éste toma sus valores como datos para usarlos posteriormente. Y las variables endógenas son las que vienen determinadas en el modelo, se construyen mediante las exógenas por así decirlo porque utilizan sus valores para crear unos nuevos.

RETARDO: Por último, podemos tener "retardos", que son funciones que simulan los retrasos que se producen en la transmisión de materiales o informaciones. En cierto modo, los retrasos actúan como amortiguadores de las variables. En general, un retardo se dice que es un tiempo de demora entre una acción y su efecto en la simulación. Un ejemplo sería el siguiente, con un retraso de $t=1$:



Fuente Imagen [40]

Cuando se tiene el diagrama causal correctamente implementado en el programa, se procede a escribir las ecuaciones dentro de cada tipo de variable, las relaciones que existen entre las variables pero escribiendo a cada una su ecuación correspondiente. Se utilizarán fórmulas aritméticas, funciones que el software nos facilita, o tablas cuando sea difícil establecer una ecuación. También habrá variables o elementos que sean constantes con lo que les fijará un valor para todo el horizonte de simulación.

Estas ecuaciones tienen que ser coherentes, así como las unidades de medida que salen, que tienen que concordar unas con otras en todo el entorno del modelo.

6. Simulación de un modelo en ordenador

Una vez introducidas las ecuaciones en el ordenador podemos dar al botón de simular eligiendo previamente un horizonte temporal de la misma, así podemos obtener las gráficas correspondientes a los datos que han sido metidos en las ecuaciones del modelo partiendo de unos datos iniciales. La evolución de las gráficas en el tiempo se puede comparar con la tendencia que llevaban los datos históricos para saber si satisfacen un comportamiento real.

Después de esto, se irá perfeccionando el modelo corrigiendo los fallos y defectos que haya en los datos de las variables.

7. Análisis de sensibilidad y test del modelo de simulación.

Llegados a este punto, sabemos que el modelo simulado reproduce aproximadamente el problema que queremos estudiar. Pero nos preguntamos si:

- a) Tiene robustez frente a condiciones extremas. ¿Es realista el comportamiento del modelo cuando se le somete a condiciones extremas?
- b) Tiene sensibilidad. ¿Cómo se comporta el modelo frente a pequeñas variaciones en los parámetros? se pueden localizar los elementos clave con este test de sensibilidad. Existen 3 distintos: Análisis de Sensibilidad numérica, Sensibilidad en el modo de comportamiento o Sensibilidad frente a las políticas.
- c) Son adecuados los límites de contorno del sistema (¿son los conceptos claves de problema endógenos?, ¿cambia el comportamiento del modelo si se modifican los límites de contorno del sistema?).
- d) La estructura es adecuada (¿es adecuado el nivel de agregación de información (variables/datos) , ¿Respeto el modelo las leyes físicas, tales como conservación de materia y energía?).
- e) Existe coherencia de unidades.

Entonces, ¿Cuándo un modelo es bueno y podemos confiar en sus resultados?

“La validación y verificación de modelos es imposible” según Sterman, J. D. Business Dynamics (2000). Pag. 864.

Porque un modelo no representa una única solución, son aproximaciones de una parte de la realidad que están basadas en hipótesis para orientar con sus resultados en la toma de decisiones. Lo fácil es probar que el modelo es malo, si después de probar infinidad de veces con hipótesis consistentes, no logramos probar que es malo, entonces se acercará más a la realidad.

8. Diseño de política y evaluación (explotación del modelo).

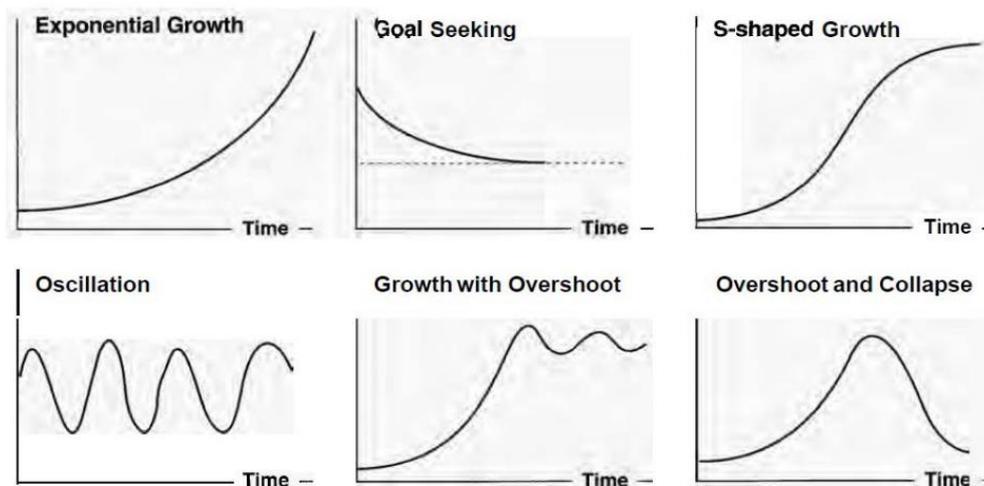
Por último, una vez que el modelo ya tiene una buena aproximación a la realidad (ofrece una salida coherente entre el pasado, la situación actual y el futuro), podremos simular los distintos escenarios futuros, que tendrán cada uno el impacto de las políticas o decisiones que nos llevarán a la solución del problema planteado. Esto consiste en la realización de:

- Escenarios. ¿Cuáles son las condiciones del entorno que deben o pueden alcanzarse?
- Diseño de política. ¿Qué nuevas reglas de decisión, estrategias y estructuras se pueden aplicar en el mundo real del problema propuesto? ¿Y cómo se pueden representar en el modelo?
- ¿Cuáles serán los efectos de las políticas? ¿Cómo son de robustas las políticas recomendadas en diferentes escenarios o frente a incertidumbres?
- Interacciones de políticas. ¿Interaccionan las políticas? ¿Hay respuestas sinérgicas o compensatorias?

Para simular estas políticas en cada escenario, lo que se hace es cambiar los valores que se desean implementar en cada una de ellas y evaluar qué pasará en un futuro, cómo evolucionan las gráficas y pensar si se resuelve el problema.

9. Conclusiones sacadas del modelo y su simulación.

Las gráficas que salen pueden tener diversos aspectos, pero los comportamientos habituales suelen ser los siguientes:



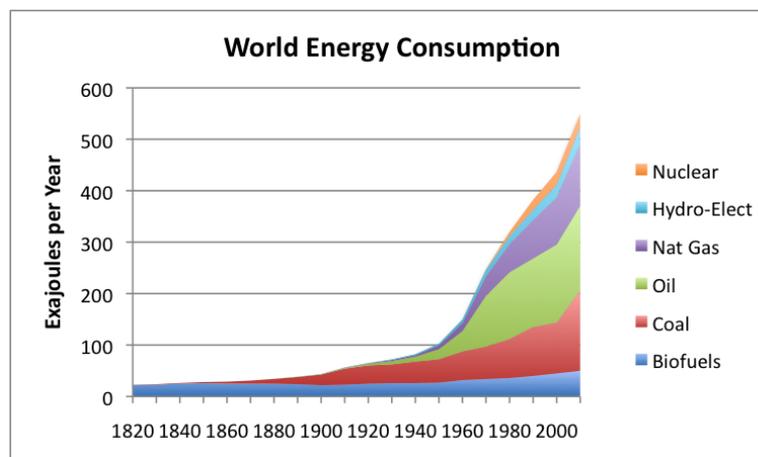
Fuente Imagen [41]

Para acabar el estudio sobre el problema implementado en el modelo, se hace un resumen sobre las políticas que podrían mejorar o empeorar los escenarios futuros a largo plazo, para poder así tomar una decisión de cómo sobrellevar el problema a corto plazo, y si es posible solucionarlo.

5.4. MODELADO DE LOS MATERIALES FV CON DINÁMICA DE SISTEMAS

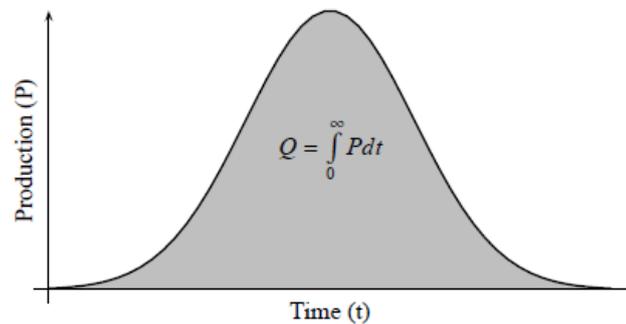
Identificar el problema ¿Cuál es el problema? ¿Por qué es un problema?

La energía solar fotovoltaica se vislumbra por los expertos como una de las energías limpias con más futuro debido a que es ilimitada y económica. Junto con la energía eólica se espera que en unos años sustituya la mala marcha de las energías fósiles puesto que son limitadas y se están agotando mientras que la demanda de consumo de energía cada vez aumenta más. El problema de las energías es que la humanidad depende en gran medida de los minerales utilizados para obtener la energía consumida y el agotamiento de estos materiales se ha visto disparado en las últimas décadas (aumento exponencial).



Fuente Imagen [42]

Este seguimiento lo previó primeramente Marion King Hubbert con su teoría llamada "Teoría del Pico de Hubbert" en la que expone que la evolución de las tasas de producción de los distintos combustibles fósiles seguían unos patrones muy similares en todos los casos, presentaban la siguiente curva:



Fuente Imagen [43]

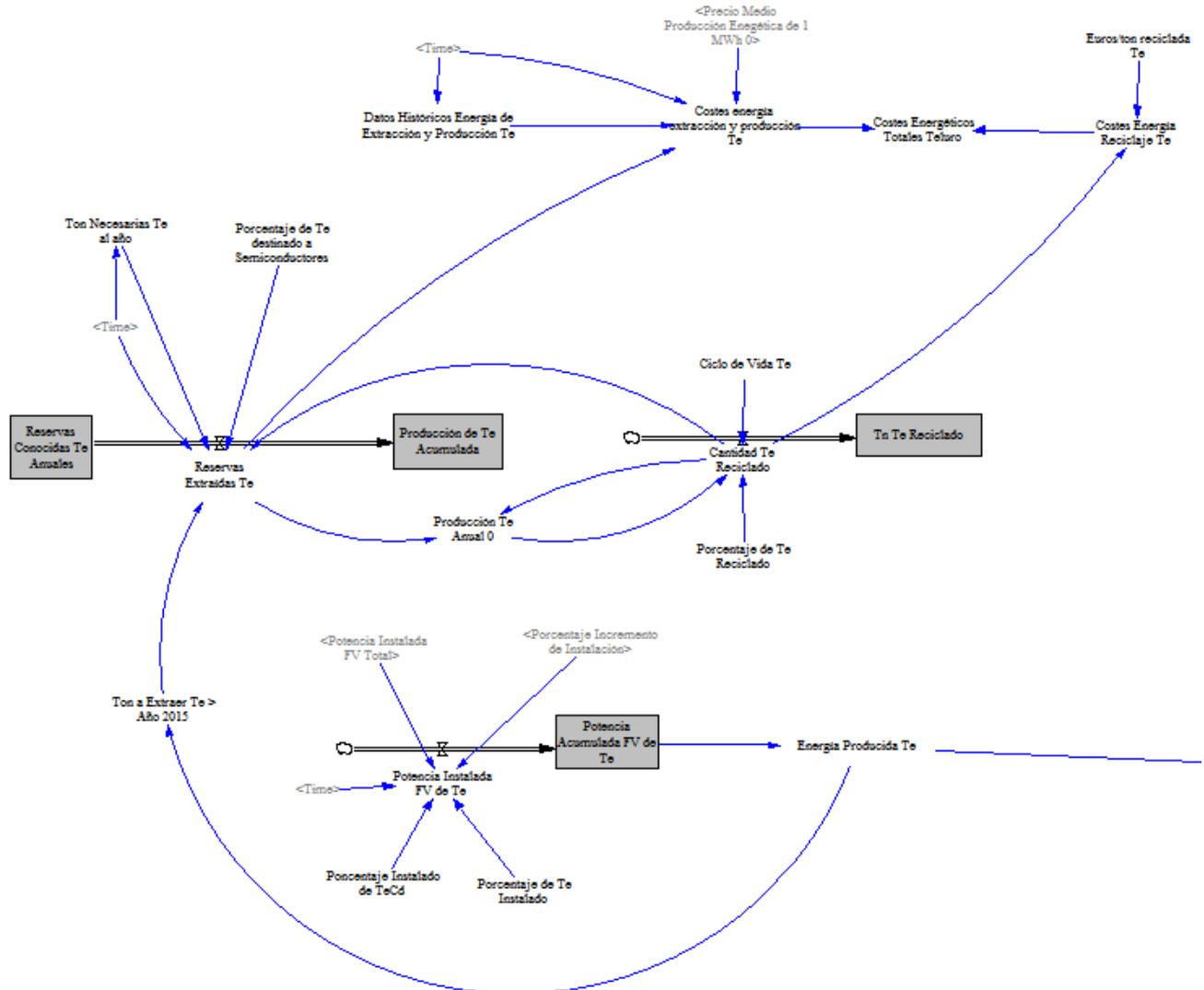
Según Hubbert, el principal motivo de que las curvas de producción siguieran este modelo, se debía a que la explotación de los yacimientos de recursos fósiles siempre seguía el mismo patrón. El comienzo de la explotación era lento (las curvas de producción aumentaban despacio al principio) porque era necesario desarrollar las infraestructuras y técnicas pertinentes. Una vez conseguido este objetivo, conociendo las mejores técnicas de extracción y disponiendo de los medios adecuados se llegaría al momento de mayor producción (y luego aumentaban más rápido, tendiendo a un aumento exponencial con el tiempo). De ahí que la curva creciera rápidamente de forma exponencial hasta alcanzar el máximo (que finalmente se llegaba a un punto de inflexión donde cada barril de petróleo que se pueda producir, costará más caro [54] porque se habrá generado una escasez en la materia o una equiparación entre los costos de extracción y el costo del barril del petróleo). Pero una vez extraído todo el recurso fósil que se encontraba en mejor estado y que era más accesible, se llegaba a un punto en el que la energía necesaria para obtener este recurso, era mayor que el valor de la energía que el recurso aportaría. Es por esto, que la producción descendía en picado al llegar a este punto (donde la curva seguía el mismo comportamiento, pero de forma decreciente). Explicando esto, Hubbert dice que “en algún momento se alcanza un nivel de extracción que no puede ser rebasado por muy avanzada tecnología que se use o por muchos pozos que se hagan”. Ahí es cuando el pico de la producción se inicia y con él la decadencia de la producción de petróleo.

Según expone Cristina Alonso Esteban en su proyecto sobre “análisis de los recursos de minerales no energéticos a nivel mundial” en el apartado “2.generalidades sobre los minerales no energéticos”, cuando Hubbert presentó su teoría en 1956, predijo que el pico de la producción de petróleo en estados unidos se produciría entre 1965 y 1970. Aunque en su momento fue ampliamente criticado, posteriormente quedó demostrado que estaba en lo cierto, con lo cual consiguió cada vez más aceptación entre la comunidad científica. De la misma forma, realizó la predicción del pico de producción global del petróleo, fechándolo entre el año 1995 y el año 2000. En la actualidad se cree que esta fecha era errónea, posiblemente debido a que Hubbert no pudo tener en cuenta en sus cálculos la crisis del petróleo que se produjo en la década de los 70 que ocasionó que se ralentizase la producción. Los últimos estudios realizados sitúan el pico global de producción del petróleo (también conocido comúnmente como peak oil) entre los años 2010 y 2015.

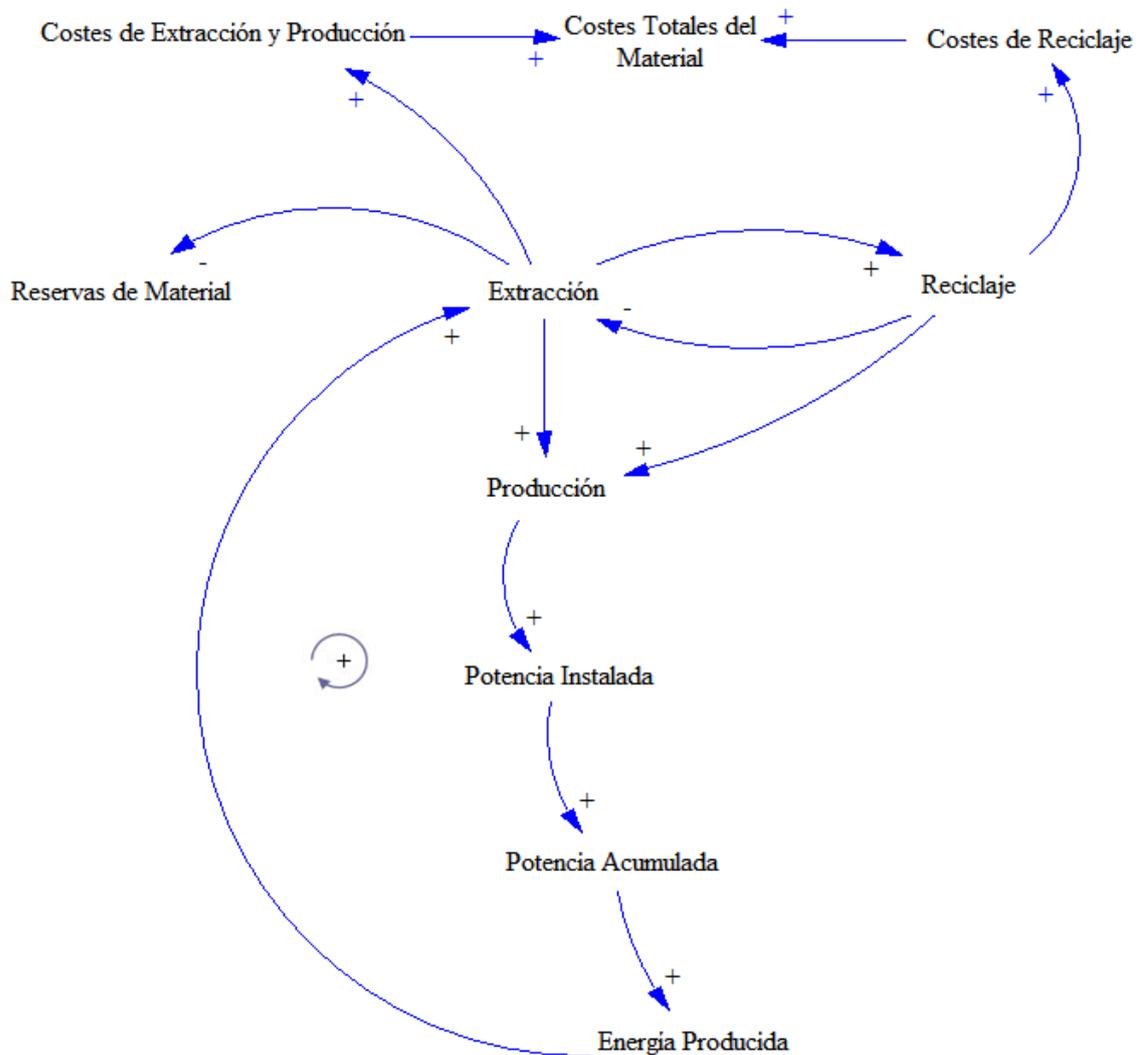
Esta teoría sería aplicable para cualquier producción de un recurso finito, por lo que también es válida para los minerales no energéticos de este proyecto. Por lo que aun que se apueste fuerte por las energías renovables y en concreto en este proyecto por la energía solar fotovoltaica, puede estar limitada debido a los recursos de los que disponemos de estos materiales, con lo que el principal objetivo de este proyecto es analizar los recursos de los materiales utilizados para fabricar los paneles solares, se preverán unos posibles escenarios futuros y se discutirá qué años de vida pueden llegar a tener cada tipo de célula por estar limitados algunos de los materiales y suponer un problema.



Para explicar las variables utilizadas en cada modelo se hace zoom explicando uno como ejemplo, el del Teluro:



Que tiene como **diagrama causal** general el siguiente:



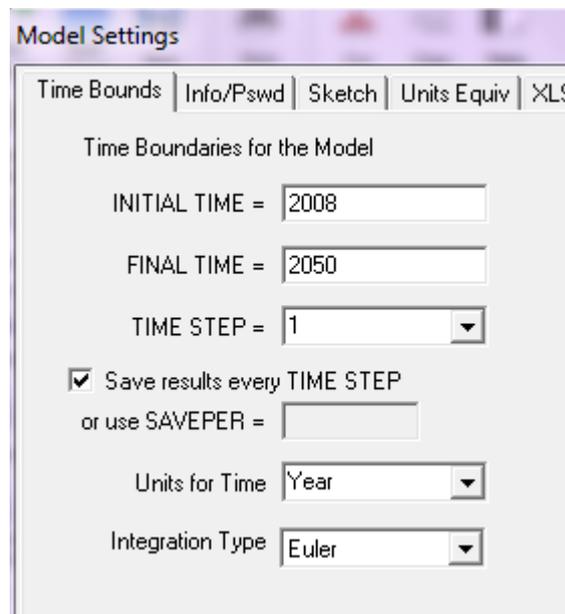
Explicación de las **relaciones funcionales** entre variables:

Para tener una idea general de todas las variables de nuestro entorno “sector fotovoltaico” susceptibles de influir en los materiales utilizados para los paneles solares, se han elegido tanto variables del material (cantidad de reservas que quedan, lo que se extrae), la producción, su posterior reciclaje (se debe hacer si se quieren conservar las reservas), como variables de coste de la industria (extracción, producción y reciclaje) y las variables relacionadas con la cantidad de GW de potencia instalada FV y energía producida en TWh. Como se puede ver, existe un flujo de realimentación positivo, pues si debe aumentar la energía producida, se debe de utilizar más cantidad de material. También se pueden visualizar polaridades negativas como la del reciclaje y extracción, donde si aumenta el reciclaje, sería necesario extraer menos material de la mina, y polaridades positivas como las de la producción de material que cuanto más se produce, más potencia instalada de paneles fotovoltaicos hay en el mundo, al igual que si aumenta la

potencia instalada, la energía que se puede producir con dichas instalaciones es mayor. Respecto a los costes pasa lo mismo, tienen polaridad positiva, si aumenta la cantidad de material extraído o reciclado, sus costes aumentan y con ello los costes totales del material.

Respecto al tiempo utilizado en el modelo, tomaremos como tiempo inicial el año 2008 pues a partir de ahí ha habido un gran crecimiento del sector fotovoltaico.

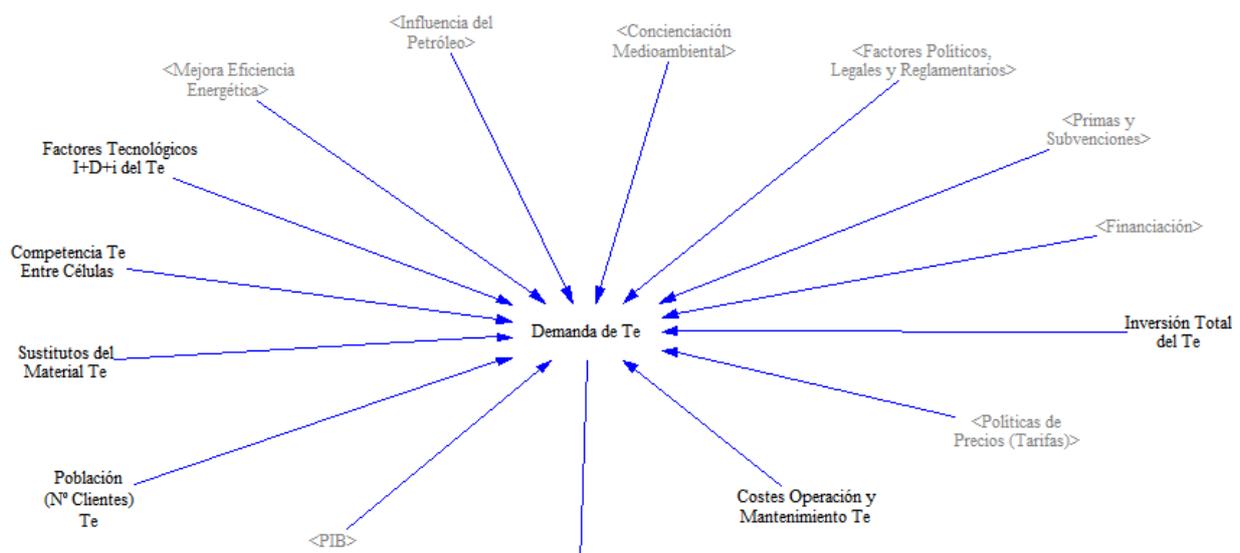
La configuración correrá de año en año hasta alcanzar el año 2050, donde estudiaremos qué ocurre en cada uno de los escenarios futuros que se explicarán otros puntos del proyecto.



La primera idea al comenzar este proyecto, fue estudiarlo mediante un análisis sobre la demanda de cada material para saber cuánta cantidad del mismo extraer, con ese fin se obtuvo un DAFO donde poder ver las variables que afectaban a la demanda [43]:

DEBILIDADES	FORTALEZAS
<p>Elevado desembolso inicial (inversión). Escasa publicidad. Limitantes y caros procesos administrativos. Complicaciones para conectarse a la red. Dependencia de la situación política y económica el país. Dependencia de la situación geográfica (debido a la fuente de energía, el sol). Dificultad de generación de valor de marca en las empresas. Dificultad para encontrar personal cualificado. Dependencia de las subvenciones y programas de primas. Costes de tecnología elevados. Tarifas eléctricas, precios. Limitados recursos materiales.</p>	<p>Mayor protección del medioambiente, respecto a otras energías. Sostenibilidad energética. Recurso solar en todas partes. Determinación del sector por superar las dificultades y problemas. Los paneles solares se transportan fácilmente.</p>
<p>Crecimiento del Sector. Concienciación de las energías renovables. Los Cumplimiento de los objetivos de la UE para 2020. La paridad de red y el autoconsumo. Alto desarrollo de I+D+i . Cada vez hay más clientes.</p>	<p>Sector muy regulado y sometido a posibles cambios de legislación. Fuerte competencia mundial en su sector y con otras energías.</p>
OPORTUNIDADES	AMENAZAS

Y del DAFO se desprendieron las siguientes variables que eran necesarias para la demanda:



Las de color negro se corresponden con las variables que son propias de cada material (en este ejemplo del Teluro), es decir las que varían dependiendo del material que queramos estudiar como por ejemplo un aumento de inversión en células de GaAs para mejorar su desarrollo sólo afectaría a ese tipo de paneles FV. Y las variables de color gris (shadow variable) son las comunes de todos los materiales, afectan a todos ellos por igual. Por ejemplo un aumento de subvenciones en el sector FV mundial, afectaría de forma favorable a todos los tipos de células fotovoltaicas pues se podrían fabricar más, y con ello, a sus materiales estudiados.

Pero debido a la gran complejidad de la demanda, que depende de todas esas variables y más, se ha optado por simplificar el modelo final al enseñado con anterioridad, pues para un análisis de la demanda se deberían de utilizar métodos de investigación y estudios estadísticos que no entran en los objetivos de este proyecto TFG. Por lo que este método se descartó pero dado su interés se expondrán cada uno de los factores que afectan porque aunque en el modelo final utilizado no aparezcan, influyen en la extracción y producción de los materiales simulados:

- PIB → Es una magnitud macroeconómica que expresa el valor monetario de la producción de bienes y servicios de la demanda final de un país durante un año.
- Mejora de eficiencia energética → Ésta es una práctica que tiene como objeto reducir el consumo de energía. Se realiza utilizando eficientemente la energía, es una manera optimizar los procesos productivos y el empleo de la energía utilizando lo mismo o menos para producir más bienes y servicios. Lo que se busca es producir más con menos energía.

Por ello los consumidores de energía pueden reducir el consumo energético para disminuir costos y promover sostenibilidad económica, política y ambiental. Los usuarios industriales (que producen células solares) y comerciales pueden desear aumentar su eficacia y maximizar así los beneficios con lo que si se realizan estas buenas prácticas se obtendrían menores costes y esto repercutiría en que se demandarían más módulos solares pues la industria podría cargar con mayores cantidades.

- Factores políticos, legales y reglamentarios → Esta variable es de las más importantes. Mohit Anand, analista solar de GTM Research, expuso así [56]: *“El mercado fotovoltaico durante el cuarto trimestre de 2015 puso de manifiesto que la demanda mundial de energía fotovoltaica está a merced del apoyo de los gobiernos, que a menudo es impredecible y muchas veces trae consigo decisiones negativas, pero también a veces resultados positivos”*.

Según GTM Research [56]: *“la participación de Estados Unidos en la demanda mundial de energía fotovoltaica prevista entre 2015 y 2020 va a aumentar de un promedio del 10% al 15% como consecuencia de la extensión del crédito fiscal a la inversión (ITC), incluso a pesar de un aumento sustancial de la demanda esperada para la región de Asia y el Pacífico (excluida de China) en 2016 y más allá. Por otra parte, los retrocesos en las ayudas en Japón, el Reino Unido y China han enfriado algo las expectativas”.*

En el año 2008, el gobierno tuvo mucha influencia en la crisis española del sector fotovoltaico. Por todo ello, aunque en países parece que sí se ayuda a salir a este nuevo sector, en otros no.

- **Concienciación Medioambiental** → Donde influyen mucho los factores culturales y sociales (cultura y concienciación de las energías limpias). Cada vez se apuesta más por las energías renovables, y en concreto la energía solar, como se expuso en otro punto al principio del proyecto, la energía solar es la que proviene de la radiación del sol y puede aprovecharse de diferentes maneras, además es una energía renovable y totalmente limpia. Debido a la enorme contaminación que tenemos en el planeta, se requiere concienciar a la gente y animar a que usen más este tipo de energías para tener un futuro mejor, reducir los gases de efecto invernadero (CO₂) y no contribuir al calentamiento global que a la larga serán perjudiciales para nosotros. Si aumenta la concienciación de las personas, aumentará la cantidad de paneles solares requeridos (la demanda).
- **Influencia del petróleo** → Actualmente hay una batalla entre el petróleo y las energías renovables que definirá el futuro de la energía. La pregunta que está en el aire es: ¿Qué es más rentable, el petróleo o las energías renovables? El banco de inversión Citigroup [57] cree que “la batalla de los costes entre el crudo barato y la fotovoltaica y la eólica, principalmente, definirá el futuro del panorama energético. Un futuro que pinta más de color verde que de negro”. Aunque la caída del precio del petróleo y del gas asociado al mismo han podido poner en un aprieto a las renovables, son éstas las que tienen mayores perspectivas a largo plazo y seguramente ganen el pulso final por cuestiones económicas, medioambientales y de seguridad de suministro.

Esta caída del precio del petróleo a corto plazo quiere decir que no tiene solución, significa el final de parte del sector como pueden ser operaciones de alto riesgo en regiones como el Ártico, arenas bituminosas y en aguas profundas. Por su parte, los costes de la fotovoltaica y la eólica han caído drásticamente y se espera que la situación continúe así, disminuyendo.

Citigroup [57] “asegura que el petróleo compite directamente contra las energías renovables en sólo alrededor del 5% del mercado, es decir, solo en aquellos lugares donde se utiliza petróleo en la generación eléctrica. Estos destinos son especialmente en Oriente Medio (Arabia Saudí utiliza el petróleo para el 55% de sus necesidades de electricidad, y el Oriente Medio en su conjunto llega al 36%), y en el Caribe (Jamaica, el 91%)”.

Por este motivo obvio de que el petróleo influye en la demanda de las energías renovables, y entre ellas la energía solar fotovoltaica.

- Política de precio (tarifas eléctricas) → *Las tarifas verdes, son más altas que las comunes. En la siguiente tabla se pueden observar los elevados costes y cómo se espera que disminuyan en los próximos años [58]:*

Cifras Indicativas*	1980	1995	2009	2020	2030	Potencial a largo plazo
Precio llave en mano del sistema.	> 30	10	3 - 4,5**	1,5 – 2.3	< 1	0,5
Coste de generación eléctrica @ 1.300 kWh/kWp año***	> 2	0,7	0,20 – 0.30	0,10 - 0.15	< 0,07	0,03
Eficiencias de módulos comerciales (máxima)	8%	12%	20%	23%	25%	40%
Eficiencias de módulos comerciales de concentración (max)	(~10%)	12%	32%	35%	40%	60%
Tiempo de retorno en energía @ 1.300 kWh/kWp año (años)	> 10	> 5	< 2	< 1	0,5	0,25

*Cantidades monetarias expresadas en EUR en valores 2009.

** El rango cubre planta de potencia (rango menor) , sistemas en edificios (rango medio), sistemas pequeños (rango mayor).

***Calculado el modelo NPVTP con parámetros de amortización a 25 años, , 6% de costes de capital, 10% O&M & costes de seguros.

Fuente Imagen [44]

Junto a estos costes de la energía fotovoltaica que seguirán disminuyendo, también es importante comentar que al coste de las baterías de almacenamiento le ocurrirá lo mismo, lo cual dará pie al gran crecimiento de las instalaciones fotovoltaicas.

- Financiación → La financiación de los proyectos de instalaciones fotovoltaicas es importante, así cuanto más halla, más demanda habrá de paneles solares, y por tanto de material. Así, hay empresas como por ejemplo la de “fotovoltaic” que proporcionan financiación con una duración entre 10 y quince años y un tipo de interés en torno al Euribor más 1%, estos préstamos permiten amortizar la financiación con la rentabilidad obtenida por la instalación [59].

Otro ejemplo es el del Banco Santander, que en el año 2012 realizó 161 operaciones de leasing fotovoltaico, con una inversión de 14,8 millones de euros en España y Portugal [60].

- Primas y Subvenciones → Una prima es una retribución adicional al dinero que reciben las energías renovables por vender la energía que producen. Por ejemplo, una planta fotovoltaica genera energía a través del sol y las placas solares. Esa energía se “vierte” a la red general para que pueda ser utilizada en los hogares y por ello recibe un dinero, según los precios del mercado. La prima es un dinero adicional a esa venta de energía.

Las primas se establecen como incentivos a los productores de electricidad a través de fuentes renovables, con el objetivo de impulsar la aparición de instalaciones de fuentes limpias para ir reduciendo la dependencia de otras energías como la nuclear. Además se establecen para que la puesta en marcha de dichas plantas sea rentable desde el primer día, ya que durante los primeros años el gasto en la tecnología que las pone en marcha es mucho mayor que el gasto luego solo de mantenimiento. En el último decreto se justifica este régimen retributivo [61] “para cubrir los costes que les permitan competir en nivel de igualdad con el resto de tecnologías en el mercado obteniendo una “rentabilidad razonable”.

Un claro ejemplo de que las primas o subvenciones es muy importante y que por ello se ha escogido para introducir en la variable de la demanda de nuestro modelo, es el sistema de primas de España, el cuál debido al aumento del déficit tarifario por la crisis, el gobierno tuvo que recortar las primas en los últimos años.

Los bancos concedieron en su día unos créditos a las empresas FV bajo unas previsiones de beneficios mucho mayores que los de ahora. Como han ido cambiando las reglas del juego a peor (sin primas obtienen menor rentabilidad) y se han ido recortando las ayudas, muchos empresarios no pueden ahora afrontar dichos créditos; por eso hay quien directamente está entregando la planta al banco.

En otros países del mundo no es así, pues el gobierno ha ayudado más a que crezca este sector. Por ello se ha elegido esta variable en forma de valor absoluto, un valor promedio de importancia en la influencia de la demanda mundial de cada material fotovoltaico.

Una vez que la fotovoltaica ya no suponga un coste para el sistema, desaparecerán las ayudas y su desarrollo será exponencial [62]. Se reducirá drásticamente nuestra huella ecológica, así como nuestra dependencia energética, al tiempo que veremos desarrollarse un sector industrial de futuro

que permita a nuestro país exportar lo que ahora no exportamos. Y todo ello sin coste alguno para la sociedad, sino todo lo contrario: proporcionando ahorros crecientes en nuestra factura energética y devolviendo con creces todas las ayudas de las que el sector ha disfrutado mientras alcanzaba su madurez tecnológica e industrial.

- Población (visto como número de clientes SI) → Recientes informes sobre el presente y futuro del sector elaborados por diversas entidades financieras y organismos internacionales señalan que en 2030 el mercado fotovoltaico se habrá multiplicado por 10 a medida que se incorporen los más de 100 millones de clientes [63] que se calcula que esta fuente de energía tendrá para esa fecha, lo que le permitirá alcanzar una producción equivalente al 10% del mix eléctrico mundial. Todo esto incentivado por la fuerte concienciación que se espera tener en un futuro por las energías limpias y la mejora de nuestro planeta.
- Sustitutos del SI (otros sustitutos del material como por ejemplo el Grafeno) → Al entrar en detalle de cada material más adelante en este proyecto, se expondrán qué materiales pueden ser sustitutos para cada tipo de material elegido en nuestro modelo. Además de todos ellos, uno que se prevé despuntará sobre todos es el grafeno, el cual se está estudiando y debido a sus diversas propiedades físicas y químicas puede ocupar el puesto de varios materiales en la industria.
- Competencia SI entre los tipos de células (entre materiales de este modelo) → En otros puntos del proyecto se expuso que para un futuro, quizás unas células tengan mejores previsiones que otras debido a muchos motivos, unas células son más baratas de producir que otras o debido a la cantidad de recursos materiales disponibles.
- Factores tecnológicos SI (I+D+i, desarrollo de nuevas células) → Cada tipo de célula se está investigando para poder aumentar su eficiencia e intentar reducir costos y materias primas en cada proceso productivo. Además de las células utilizadas para el modelo, hay más tipos de ellas que se están estudiando para descubrir nuevas formas de aumentar la eficiencia y eficacia energética (un ejemplo de ello son las multi-unión o las de nano – tinta de silicio). Esta variable es importante porque para que el sector crezca se necesita que la eficiencia de los módulos sea mucho mayor, para capturar más sol con menor material y así producir más electricidad.
- Inversión SI de las personas, empresas e industrias por la energía solar (en nuevas plantas) → Es la inversión en instalaciones fotovoltaicas de producción

de electricidad para la posterior venta de la energía producida a la compañía eléctrica, por un plazo y unas tarifas garantizadas o para autoconsumo en el hogar.

El aumento de inversiones en nuevas plantas supondría sobre todo aumentos significativos en la potencia instalada, como impacto directo.

Sin embargo, el desarrollo de estas tecnologías está siendo muy importante y cabe pensar que los costes de la inversión van a descender de forma significativa, especialmente en las tecnologías menos maduras, en los próximos años y más concretamente en el horizonte del año 2030. En cuanto a las ramas de actividad que recibirían un impacto directo de estas inversiones, cabe señalar que las más beneficiadas serían las de maquinaria y equipo mecánico y la de fabricación de maquinaria y material eléctrico, también los servicios de ingeniería y asesoramiento técnico.

Esta variable tiene relación con las emisiones de CO₂, pues a mayor inversión en esta energía limpia, menor contaminación. Cuando la gente se conciencie de esto y el sector se estabilice, se realizarán inversiones de forma exponencial [64]. En este modelo se considera que las inversiones pueden cambiar dependiendo de cada tipo de material utilizado en los distintos paneles solares, con lo que es variable entre ellos.

- Costes de operación y mantenimiento SI (precios industria) → La tendencia predominante en la evolución de las energías limpias en el mundo indica que la tecnología que tendrá un mayor desarrollo en el futuro será la solar fotovoltaica, que presenta una trayectoria en constante crecimiento como consecuencia de la rápida reducción de los costes, que han disminuido hasta un 80% en los últimos años [66].

Y que seguirán disminuyendo en previsiones futuras, debido a la investigación de las distintas tecnologías. Esta variable se ha considerado que no es constante, pues depende de cada tipo de panel solar fabricado, cada uno tienen sus costes de fabricación.

En nuestro primer modelo expuesto hasta ahora, se ha realizado un modelo base o BAU (BUSINESS AS USUAL) en el que se intenta seguir con la tendencia que había hasta ahora, con la continuidad de los datos históricos entre los años 2008 y 2014. Ese modelo será analizado posteriormente y se explicarán los resultados obtenidos, después partiendo de dicho modelo, lo que se quiere realizar es un estudio de los materiales para dos escenarios distintos, uno pesimista (en el que la potencia

instalada FV llegue a ser 1 TW en el año 2050) y otro optimista (en el que la potencia instalada FV llegue a ser 4 TW en el año 2050) siendo el modelo base el escenario medio o realista.

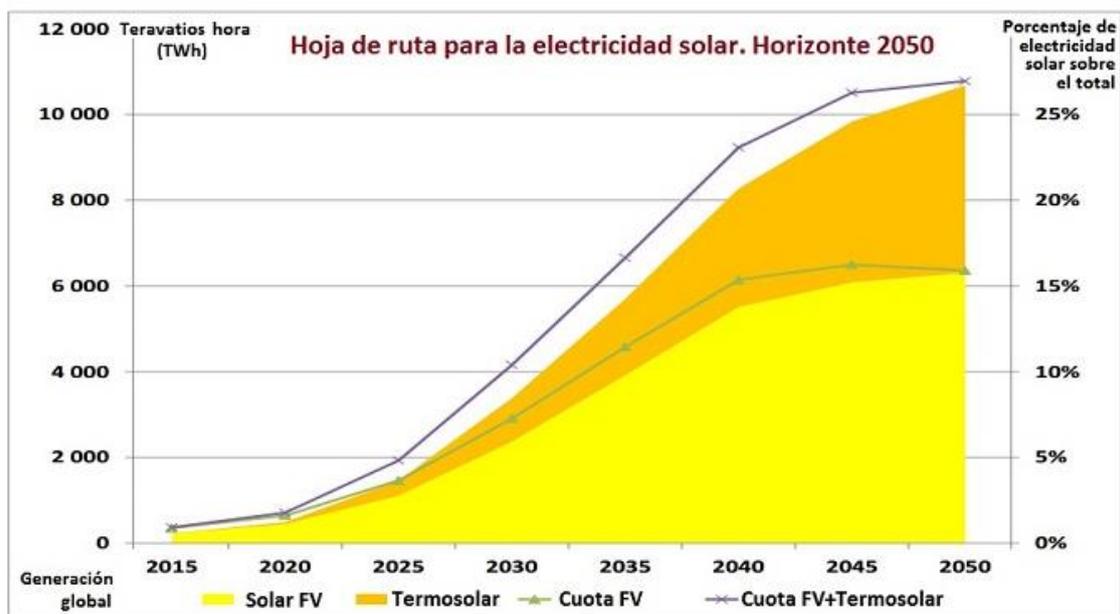
Para querer estudiar estos datos, se parte del hecho de que la hipótesis inicial, en la que se encuentra ahora la potencia instalada de la FV es, según Ludwing Guillén García [67]:

“La producción anual de energía eléctrica generada por la energía fotovoltaica a nivel mundial equivalía en 2014 a cerca de 160 TWh (teravatios-hora), suficiente para abastecer las necesidades energéticas de más de 30 millones de hogares, cubriendo un 0.85% de la demanda mundial de electricidad”.

Sabiendo que en el artículo científico “Natural resource limitations to terawatt-scale solar cells” por Coby S.Tao , JiechaoJiang , MengTao [76] exponen que:

“La demanda prevista de energía alcanzará los 28 TW en el año 2050 y 46 TW en el año 20100 debido al despliegue que se va a producir. Las células solares como fuente de energía eléctrica tendrán que expandirse a una escala de decenas de teravatios pico con el fin de convertirse en la principal fuente de energía en el futuro.”

Y puesto que Eduardo Collado en el artículo “El hoy y el mañana de la fotovoltaica” predice los datos del sector fotovoltaico de la siguiente forma [68]:

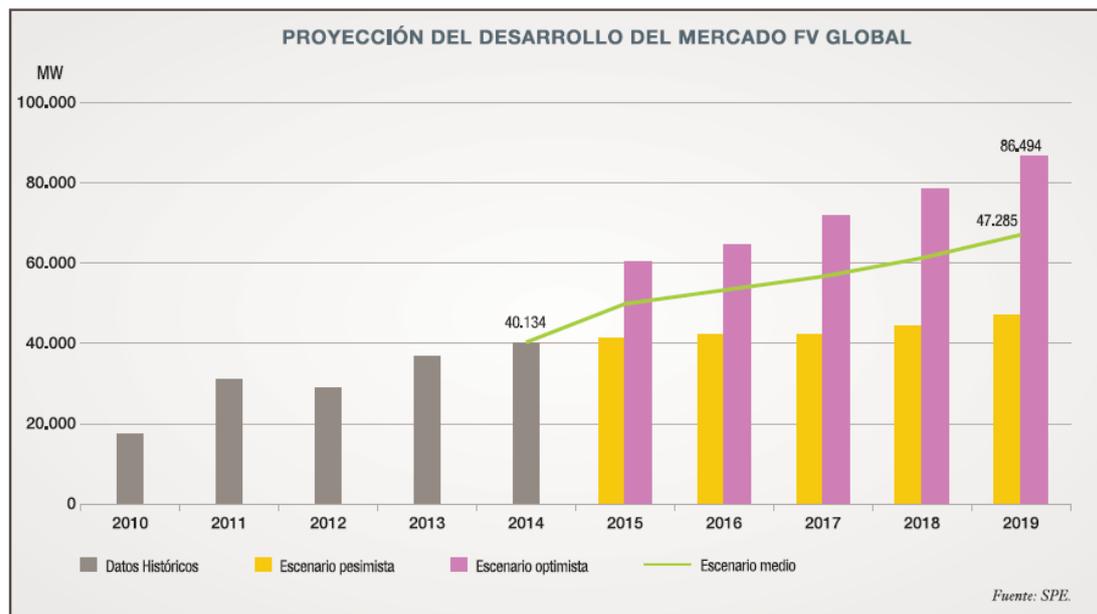


Fuente Imagen [45]

Lo que se quiere conseguir en los dos escenarios futuros es saber cómo evolucionarán las reservas del material (junto con su extracción, producción y reciclaje) estando en un escenario pesimista en el que se consiga un 5% de porcentaje de electricidad solar sobre el total en el año 2050, que equivaldría a $28 \text{ TW} \times 0,05$ aproximadamente 1 TW de potencia instalada, lo que daría como resultado cerca de 2000 TWh de energía producida y un escenario optimista en el que se desarrolle a gran escala la energía fotovoltaica, teniendo un 15 % del porcentaje de electricidad solar sobre el total en el año 2050, que equivaldría a $28 \text{ TW} \times 0,15$ aproximadamente 4 TW de potencia instalada dando como resultado una energía producida de 6000 TWh.

El modelo base, como se expuso anteriormente es un modelo intermedio entre esos dos escenarios, correspondería al escenario moderado, medio o realista en el que se sigue la tendencia que había habido hasta ahora.

Así, el propósito del análisis de sistemas es obtener la evolución de las reservas del material teniendo estas 3 líneas fijadas como meta para el año 2050 en el mundo:



Fuente Imagen [46]

El escenario de 4 TW, necesita que se desarrolle el sector fotovoltaico a gran escala, esto ayudaría por otra parte a cumplir los objetivos europeos de energía de los próximos años, contribuyendo así con los objetivos mundiales. Se mejoraría lo siguiente:

Objetivos europeos de clima y energía [69]

Objetivos para 2020:

- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero un 20%, como mínimo, respecto a los niveles de 1990
- obtener un **20%** de la energía a partir de fuentes renovables
- Mejorar la eficiencia energética en un 20%.

Objetivos para 2030:

- 40% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero
- Al menos 27% de energías renovables
- Aumento de la eficiencia energética en un 27-30%
- 15% de interconexión eléctrica (es decir, el 15% de la electricidad generada en la UE debe poder transportarse a otros Estados miembros).

Objetivo para 2050:

80-95% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a los niveles de 1990. La Hoja de Ruta de la Energía para 2050 muestra el camino para alcanzar esa meta.

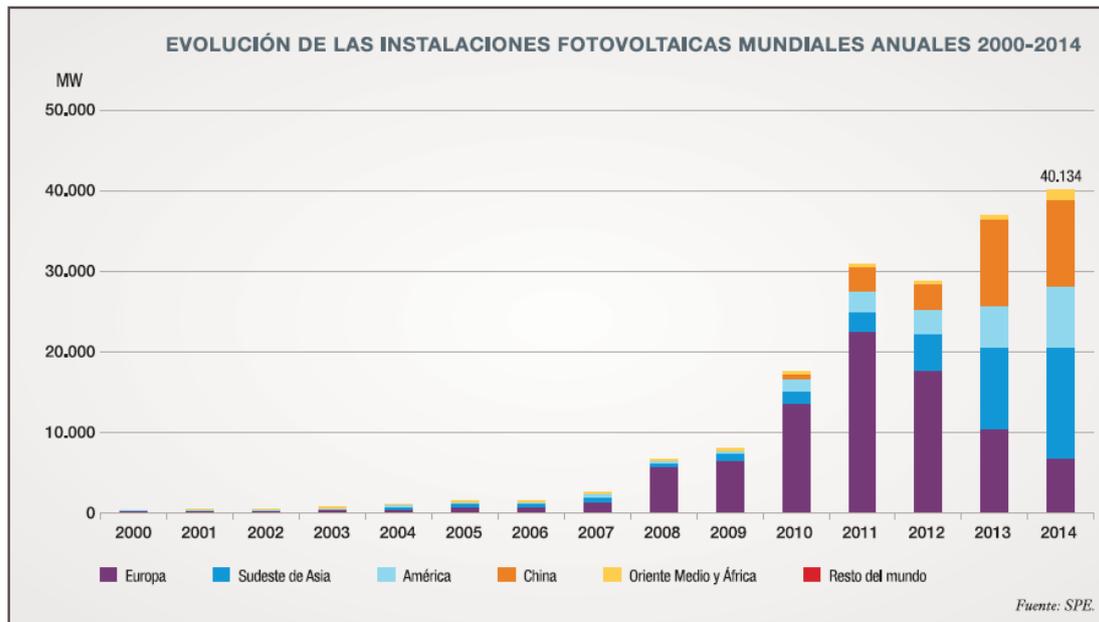
Actualmente, ¿Vamos por el buen camino?

La UE está avanzando adecuadamente para alcanzar los objetivos de 2020:

- Los gases de efecto invernadero se redujeron un 18% entre 1990 y 2012.
- La cuota de las energías renovables pasó del 8,5% en 2005 al 14,1% en 2012.
- Se prevé que para 2020 la eficiencia energética experimente una mejora del 18-19%. Este porcentaje es algo inferior al 20% establecido, pero podremos alcanzar ese objetivo si los Estados miembros aplican toda la legislación europea necesaria.

7. MODELOS

Unos de los datos importantes para el modelo son: la potencia instalada de las células FV y su potencia acumulada:



“Evolución de la potencia fotovoltaica instalada (anual) en todo el mundo”

Fuente Imagen [47]

La capacidad instalada en todo el mundo durante 2015 ascendió a al menos 48,1 GW y posiblemente hasta 50 GW, si se toman en consideración todos los países declarantes y no declarantes [65].

Aquí se pueden ver los países que más poder tienen sobre la energía FV mundial y sus puestos (*Fuente Imagen [48]*):

TABLE 1: TOP 10 COUNTRIES FOR INSTALLATIONS AND TOTAL INSTALLED CAPACITY IN 2015

TOP 10 COUNTRIES IN 2015 FOR ANNUAL INSTALLED CAPACITY				TOP 10 COUNTRIES IN 2015 FOR CUMULATIVE INSTALLED CAPACITY			
1		China	15,2 GW	1		China	43,5 GW
2		Japan	11 GW	2		Germany	39,7 GW
3		USA	7,3 GW	3		Japan	34,4 GW
4		UK	3,5 GW	4		USA	25,6 GW
5		India	2 GW	5		Italy	18,9 GW
6		Germany	1,5 GW	6		UK	8,8 GW
7		Korea	1 GW	7		France	6,6 GW
8		Australia	0,9 GW	8		Spain	5,4 GW
9		France	0,9 GW	9		Australia	5,1 GW
10		Canada	0,6 GW	10		India	5 GW

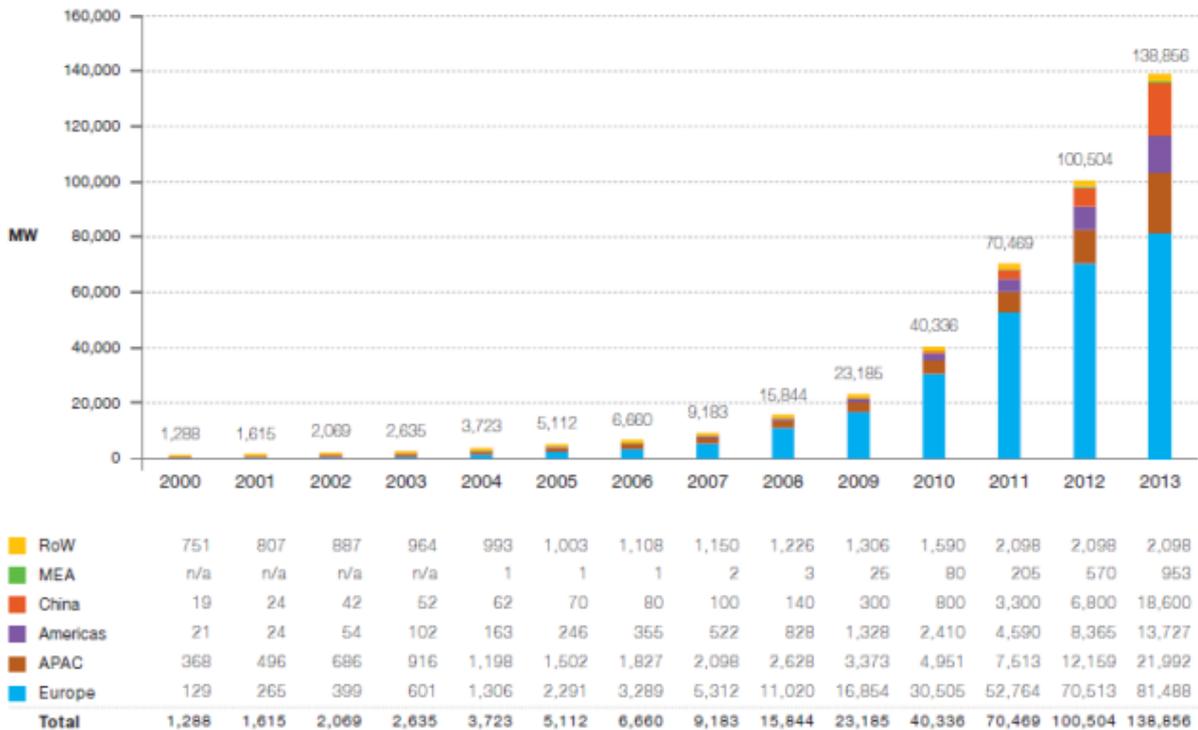
China sigue en cabeza respecto a cantidad de instalaciones fotovoltaicas. Mientras, en Europa, El Reino Unido instaló 3,5 GW en 2015 [65], tomando el primer lugar en el mercado europeo, mientras que Alemania se redujo a 1,46 GW, frente a los 3,3 GW en 2013 y 1,9 GW en 2014. Esto sucedió en un contexto de avance reducido - en los aranceles, los cambios en las regulaciones de apoyo PV hacia la integración en los mercados de electricidad y la introducción de limitar las ofertas para las instalaciones fotovoltaicas a escala comercial. La India, por su parte, ha instalado alrededor de 2 GW en 2015 [65], un salto significativo que podría conducir a un desarrollo aún mayor en los próximos años. Corea confirmó su desarrollo con 1,0 GW de fotovoltaica instalada en 2015, en comparación con 0,9 GW en 2014.

Juntos, los cinco primeros países representan más del 78% de las instalaciones anuales en 2015 y menos de 71% en términos de capacidad instalada acumulada a finales de 2015. Los principales siete (países con más de 1 GW de instalaciones anuales) contribuyeron a 83% del mercado mundial fotovoltaico [65].

Detrás de los siete primeros, ningún país ha instalado más de 1 GW de sistemas fotovoltaicos en 2015. Francia instaló 879 MW en 2015. Australia sigue siendo un mercado fuerte, con 935 MW instalados en 2015, pero con un cambio de segmentación en curso. Por último, Canadá instaló alrededor de 600 MW [65].

Por otra parte, los sistemas de medición neta permitieron que el mercado se desarrolle en varios países europeos, sino también el colapso de una vez que los reglamentos fueron cambiados. Algunos países europeos que antes crecían rápidamente ahora se han estancado o experimentado adiciones muy pequeñas o reducidas significativamente. España informó de unos 56 MW [65] de nuevas incorporaciones en un difícil contexto de regulaciones severas para los usuarios avanzados que incluyen un "impuesto solar", que es un impuesto sobre el consumo propio.

Sin embargo, en otros países, se han adoptado políticas que podrían favorecer el desarrollo de la energía fotovoltaica en los próximos años, especialmente en México, Brasil y Perú.



“Evolución de la potencia fotovoltaica instalada (acumulada) en todo el mundo”

Fuente Imagen [49]

Europa, aún con regulaciones y medidas poco favorecedoras, sigue siendo la que más potencia acumulada posee, como se puede ver en el gráfico anterior.

Todos estos datos se tomarán como referencia a la hora de construir las variables de los modelos llamadas “Potencia Instalada FV del material” y “Potencia Acumulada FV del material”. Mientras que la variable denominada “Potencia Instalada FV Total” toma los datos de la potencia instalada del gráfico anterior, los totales (suma de todas las células).

Respecto a la energía producida, se ha obtenido una proporción que se utilizará en todos los materiales, mediante datos donde aparecen cantidades de las instalaciones fotovoltaicas y energía generada de las Islas Baleares [70]:

Potencia instalada (en megavatios, MW)	Islas Baleares		Producción (en gigavatios hora, GWh)		
			Año 2015		
	MW	% 15/14	GWh	% 15/14	
Hidráulica	-	-	Hidráulica	-	-
Carbón	510	0,0	Carbón	2.119	-12,3
Motores diésel	199	0,0	Motores diésel	767	10,5
Turbina de gas	678	0,0	Turbina de gas	600	0,6
Turbina de vapor	-	-	Turbina de vapor	-	-
Fuel / gas	877	0,0	Fuel / gas	1.367	5,9
Ciclo combinado	934	0,0	Ciclo combinado	821	79,2
Generación auxiliar	-	-	Generación auxiliar	11	37,5
Hidroeléctrica	-	-	Consumos generación	-291	-2,1
Resto hidráulica	-	-	Hidroeléctrica	-	-
Eólica	4	0,0	Resto hidráulica	-	-
Solar fotovoltaica	78	0,0	Eólica	6	-1,7
Térmica renovable	2	0,0	Solar fotovoltaica	124	1,3
Cogeneración y resto	86	0,0	Térmica renovable	2	-5,5
Total	2.490	0,0	Cogeneración y resto	330	17,3
			Generación neta	4.488	4,7
			Enlace Península-Baleares	1.328	2,3
			Demanda [b.c.]	5.816	4,1

Fuente Imagen [50]

Se tiene que con 78 MW de potencia instalada (0,078 GW) se podrían llegar a generar como máximo $0,078 \text{ GW} \times 24 \text{ horas/día} \times 365 \text{ días/año} = 683,28 \text{ GW}$ en un año, como se puede ver con esa cantidad solamente se generaron 124 GWh por lo que la relación es $683,28/124 = 5,5$.

Esto sucede debido a que los paneles solares fotovoltaicos necesitan estar en el lugar correcto de insolación para dar una eficiencia del 100%, también influye en esto el número de horas que hace sol al día y por supuesto la eficiencia de las células solares fotovoltaicas, que como se expuso en otros puntos actualmente suelen dar un 20 % como máximo de eficiencia energética. Por todo ello se tiene esa pérdida de generación de energía, que en un futuro se deberán mejorar esos aspectos para que el coeficiente sea menor.

Se han escogido los datos de las Islas Baleares debido a que es un clima en el que hay niveles altos de insolación, además de estar en el meridiano de Greenwich (conteo de horas al día o solares).

A continuación se detallan los datos y fórmulas introducidas en cada modelo de material para el escenario base.

7.1 MODELO DEL SILICIO



Fuente Imagen [51]

Símbolo Si en la tabla periódica, número atómico 14 y peso atómico 28.086. El silicio es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre, constituye el 27.72% de la corteza después del oxígeno que constituye el 46.6%, y seguido de éste se encuentra el aluminio con un 8.13%. El silicio tiene las propiedades físicas y químicas de los metaloides, posee lustre metálico y es fácilmente quebradizo. Es casi tan electropositivo como el estaño y mucho más positivo que el germanio o el plomo. En su forma más pura, el silicio es un semiconductor intrínseco, aunque la intensidad de su semiconducción se ve enormemente incrementada al introducir pequeñas cantidades de impurezas, por ello este material se utiliza mucho en [35]:

Células fotovoltaicas → Para la conversión directa de energía solar en eléctrica se utilizan obleas cortadas de cristales simples de silicio de grado electrónico.

Chips de silicio → Se emplean en circuitos integrados.

El silicio elemental crudo y sus compuestos intermetálicos → Se emplean como integrantes de aleaciones para dar mayor resistencia al aluminio, magnesio, cobre y otros metales.

El silicio metalúrgico con pureza del 98-99% → Se utiliza como materia prima en la manufactura de compuestos organosilícicos y resinas de silicona, elastómeros y aceites.

El dióxido de silicio → Se emplea como materia prima para producir silicio elemental y carburo de silicio.

Los cristales grandes de silicio → Se utilizan para cristales piezoeléctricos.

Las arenas de cuarzo fundido → Se transforman en vidrios de silicio que se usan en los laboratorios y plantas químicas, así como en aislantes eléctricos.

Una dispersión coloidal de silicio en agua → Como agente de recubrimiento y como ingrediente de ciertos esmaltes.

Como se expuso en otros puntos, alrededor del 92% de toda la energía fotovoltaica comercializada en el mundo procede de celdas de silicio: monocristalino (~24%), policristalino (~65%) y amorfo (~3%) en el año 2013, aunque los amorfos presentan una tendencia en su demanda a disminuir, no como en el caso del silicio monocristalino, que en el año 2015 se preveía un aumento de demanda del 20 % [38].

El producto elaborado en la planta de Silicio es lo que se denomina silicio solar. Se trata de un material con un 99,9999999% (los denominados nueve nueves) de pureza, un grado aceptable para la fabricación de placas solares, pero no para la industria de los semiconductores, que necesita un índice del 99,999999999% (once nueves). Al menos esa ha sido la exigencia de la industria electrónica [39].

Respecto a esa producción y uso doméstico, en Estados Unidos se obtuvo en el año 2014 un valor estimado de aleaciones de silicio y producción de metal de 1,24 mil millones de dólares [36]. Cuatro compañías producen materiales de silicio en siete plantas, todas ellas al este del río Mississippi.

En el mundo, los principales consumidores de metal de silicio son productores de aluminio, aleaciones, la industria química y las industrias de semiconductores y de la energía solar, que fabrican chips para computadoras y las células fotovoltaicas de gran pureza de silicio, respectivamente, esto último representa sólo un pequeño porcentaje de la demanda de silicio.

Los países líderes en la producción de ferrosilicio eran, en orden descendente y sobre una base de peso bruto: China, Rusia, Noruega, Estados Unidos, y Ucrania, y para la producción de silicio metal fueron China, los Estados Unidos, Noruega, Brasil y Francia. China fue, con mucho, el principal productor de ferrosilicio (6.000.000 toneladas) y el metal de silicio (1.300.000 toneladas) en 2014 [36].

Las principales fuentes de importación en EEUU (2010-13) fueron: Rusia, China, Canadá, Venezuela, Brasil, Africa del Sur y Australia.

Según el reporte “*EE.UU. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Enero el año 2015 sobre los recursos mundiales*” [36], la fabricación de metal de silicio y aleaciones son abundantes y, en la mayoría de países productores hay suficiente para abastecer las necesidades mundiales durante muchas décadas.

La razón fundamental para este problema de desabastecimiento se encuentra en la limitada oferta de silicio de grado semiconductor, componente fundamental de

los paneles fotovoltaicos. Aunque el silicio es un material muy abundante en la tierra, su depuración y cristalización está en manos de 6 empresas a nivel mundial [37].

Como consecuencia inmediata, los precios de los paneles fotovoltaicos de silicio están comenzando a subir, tras años de bajadas consecutivas debidas al importante incremento de la demanda. Por ello se ha elegido analizar este material pues es importante saber qué pasará con él en un futuro, no tanto por limitación de cantidad de recursos, sino por su evolución en la industria y costes.

Los posibles materiales sustitutos de este material dentro de unos años pueden ser el Arseniuro de galio y germanio, que son los principales sustitutos del silicio en semiconductores y aplicaciones infrarrojas [36]

El reciclaje de placas solares permite la reutilización del silicio para la construcción de nuevas placas. Es importante señalar que el silicio supone el 70% del coste de una célula solar, por lo que el reciclaje de este material es indispensable para la sostenibilidad del sector [41].

La mayoría de paneles de silicio están compuestos del 10 por ciento de aluminio, el 75 de vidrio, el 2 por ciento, silicio, y el 0,5 por ciento es cobre.[40]

En el proceso de reciclaje, primeramente se retira el marco de aluminio del módulo, después se les aplica un proceso mecánico o térmico para separar las diferentes fracciones y finalmente se les aplica un proceso químico. De los paneles se pueden llegar a reciclar un 72,85% del silicio [40], con una pureza entre 99,995 y 99,9999.

Aun así, todavía no se tiene mucha experiencia en el campo del reciclaje de la energía fotovoltaica, al ser unos dispositivos relativamente nuevos, no hay muchas instalaciones donde llevar a cabo este cometido. Actualmente sólo hay dos métodos de reciclaje para los paneles que han sido testados y puestos en práctica [42]:

- Tratamiento del Silicio cristalino de Deutsche Solar (Alemania)
- Tratamiento de Teluro de Cadmio de First Solar (EUA, Alemania y Malasia)

Por ello, el reciclado de paneles fotovoltaicos no es todavía económicamente rentable del todo en la actualidad debido a que los volúmenes tratados son insignificantes pero se prevé que en un futuro esto cambie y aumente, a partir del año 2030 empezarán a generarse grandes cantidades de residuos de todos los materiales fotovoltaicos a nivel mundial.

Es importante exponer, que existen más incentivos económicos a la hora de reciclar el resto de tipos de paneles debido a los componentes básicos más difíciles de encontrar en la naturaleza y a su alto nivel de toxicidad (cadmio, indio, telurio y otros metales raros).

A nivel europeo, se estima que las cantidades significativas empiecen a aparecer a partir del año 2050 [40]. De estas cantidades, la mayoría corresponderán a los paneles de primera generación (silicio) que representarán más del 40%.

Se dice que la gestión de los paneles empieza a ser económicamente viable a partir de las 20.000t/año, aunque criterios más realistas apuntan a las 40 - 50.000 t/año [42].

Variables y datos propuestos para el modelo:

Reservas Conocidas SI Anuales

Valor: IF THEN ELSE((Reservas Conocidas SI Anuales-Reservas Extraídas SI)<=0,0,-Reservas Extraídas SI)

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 1.6e+011

Tipo de Variable: Stock

Como el silicio es uno de los elementos más abundantes en la tierra no se encontraron datos fiables sobre las reservas que quedan, por lo que se ha estimado mediante una proporción de reservas del arsénico:

ARSÉNICO	SILICIO
52700 x 20 = 1054000 toneladas en el año 2008 (fuente USGS del año 2010)	X
1,5 ppm	227.000 ppm

$$X = 1,6 \times 10^{11} \text{ Ton Reservas de Silicio}$$

En la fórmula se puede ver que si las reservas decaen hasta un número menor a 0, se limita a esa cifra para que no den reservas negativas en las gráficas.

Reservas Extraídas SI

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Toneladas necesarias de SI al año 0
0*Consumo Industria Solar),("Ton a Extraer SI > Año 2015"-Cantidad SI Reciclado))

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Flujo

Para los años anteriores que están comprendidos entre el año 2008 y 2014 coge los datos históricos de extracción-producción (puesto que son los totales de todas las industrias, se multiplica por el porcentaje de FV, lo que se utiliza dicho material para la industria solar fotovoltaica) y en años sucesivos, a partir del 2015 cogerá los datos en toneladas de material que se necesitarán para conseguir los TW instalados del escenario deseado, restándole la cantidad reciclada ese año, para obtener sólo la extracción necesaria.

Toneladas necesarias de Si al Año

Valores gráfica: ((2008,6e+006)-
(2014,8e+006]),(2008,6.16e+006),(2009,6.31e+006),(2010,7.29e+006),(2011,
7.37e+006),(2012,7.6e+006),(2013,7.88e+006),(2014,7.68e+006))



Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Los datos relativos al gráfico son la producción Mundial Total de Silicio en los últimos años:

Año 2008 – 6.16e+006 Ton Métricas

Año 2009 – 6.31e+006 Ton Métricas

Año 2010 – 7.29e+006 Ton Métricas

Año 2011 – 7.37e+006 Ton Métricas

Año 2012 – 7.6e+006 Ton Métricas

Año 2013 – 7.88e+006 Ton Métricas

Año 2014 – 7.68e+006 Ton Métricas

Fuente [36]: “EE.UU. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Enero el año 2015”

Consumo Industria Solar

Valor: 1-0.6

Unidad: Porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Porcentaje de tn que le queda a la industria solar después de ir a parar el silicio a la industria microelectrónica (60 %). A la industria solar le quedaría un 40%.

Según el experto de Isotón [71]: “Desde 1997 hemos vivido un crecimiento sostenido de un 20 a un 30% anual; mientras que el de la microelectrónica lo hace a un ritmo que oscila entre un 2 y un 5%. En ese año el consumo de silicio para fines relacionados con la energía solar era de un 5% de la producción total; en 2005 alcanzaba el 40%”.

Producción de SI Acumulada

Valor: Reservas Extraídas SI

Valor Inicial: 2.464e+006

$6.16e+006$ (producción)*0.4 (% FV) = 2464000 Toneladas producidas de silicio en el año 2008 sólo para la energía solar

Unidades: Toneladas

Tipo de Variable: Stock

Producción de SI Anual 0

Valor: Cantidad SI Reciclado + Reservas Extraídas SI

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Ciclo de Vida SI

Como se expuso en otros puntos, un panel solar suele tener una vida útil entre los 25-30 años, para este caso se escoge 30 años pues este dato sobre los paneles de

silicio es más fiable que tenemos, los primeros paneles de este tipo de material se han empezado a reciclar hace poco.

Tipo de Variable: Auxiliar

Cantidad SI Reciclado

Valor: DELAY FIXED(Producción SI Anual 0*Porcentaje de SI Reciclado, Ciclo de Vida SI,179872)

Unidades: toneladas

Como los paneles tienen una duración de 30 años, hasta esta fecha no se reciclarán, con lo que a las toneladas producidas cada año se las pone un delay (retraso) para que llegada esa fecha se reciclen y siga el ciclo de producción.

Para los años anteriores a 2038, la cantidad de reciclaje que proviene de los mismos es insignificante (según USGS) por lo que para tener un modelo más cercano a la realidad puesto que algo aunque sea una cantidad pequeña se ha reciclado, se pone un 10 % de lo reciclado en el año 2008 respecto a la producción de material = $1.79872e+006 \text{ ton} \times 0.10 = 179872 \text{ ton}$

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje de SI Reciclado

Como se expuso en este punto del proyecto, el porcentaje de reciclaje aproximado para el silicio es de: 72.85/100.

Unidad: porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Tn SI Reciclado

Valor: Cantidad SI Reciclado

Unidades: toneladas

Valor Inicial: $1.79872e+006$

El valor inicial toneladas recicladas en el año 2008 = producción inicial (2464000 ton) x 0,73 reciclado = 1798720 ton

Tipo de Variable: Stock

Costes Energía Reciclaje SI

Valor: Euros Ton Reciclaje SI*Cantidad SI Reciclado

Unidades: euros

Tipo de Variable: Auxiliar

Euros Ton Reciclaje SI

Valor: 250 (Ver Anexo 15.2. Costes de reciclaje)

Unidad: euros/ton

Tipo de Variable: Auxiliar

Costes Energéticos Totales Silicio

Valor: Costes energía extracción y producción SI + Costes Energía Reciclaje SI

Unidad: euros

Suma aproximada de los costes totales que le cuesta la producción (reciclaje incluido) a la industria solar fotovoltaica.

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos Históricos Energía de Extracción y Producción SI

Valores gráfico: ((2008,0)-(2014,1e+009)],(2008,7.59773e+007),(2009,1.43301e+008),(2010,2.30012e+008),(2011,4.63102e+008),(2012,6.88883e+008),(2013,8.2649e+008),(2014,9.265e+008))



Unidad: MWh

MWh energía consumida al año en extraer, suministrar y producir Silicio.

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver Anexo 15.4. Gastos energéticos de los materiales)

Costes energía extracción y producción SI

Valor: IF THEN ELSE(Time<2015,Datos Históricos Energía de Extracción y Producción SI*Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0,(Reservas Extraidas SI*9.265e+008*Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0/3.072e+006))

Unidad: euros

En el año 2014 se extrajeron $7.68e+006 * 0.4 = 3072000$ toneladas con una energía de $9.265e+008$ MWh

Tipo de Variable: Auxiliar

Para los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, cogerá los datos de gasto históricos y los multiplicará por su precio, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-productadas con la energía que han consumido para extraerse y producirse en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de material que se obtengan para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de energía para extraer y producir dichas cantidades, posteriormente se multiplica por su precio para tener los costes.

Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0

Valor: 40

Unidad: euros/MWh

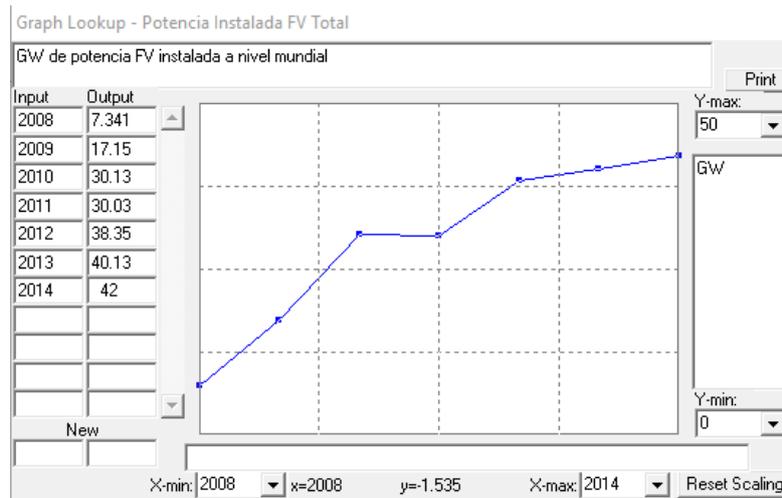
Respecto a la productividad, la energía fotovoltaica es de las más caras del mundo. Cada MWh producido ha costado 150/450€ (en comparación con 35-175€/MWh de la eólica y 40-50€/MWh de las centrales eléctrica y nucleares.[77]

Puesto que la industria FV a la hora de producir no va a utilizar su propia energía generada, se cogerá como dato el más barato de todas las energías, 40 euros de las centrales eléctricas.

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV Total

Valores gráfico: ((2008,0)-(2014,50]),(2008,7.341),(2009,17.15),(2010,30.13),(2011,30.03),(2012,38.35),(2013,40.13),(2014,42))



Unidades: GW

GW de potencia FV instalada a nivel mundial (entre todas las células FV)

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV de SI

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Potencia Instalada FV Total*0.92),RAMP(Potencia Instalada FV Total*0.92*Porcentaje Incremento de Instalación,2015,2050)+38.64)

Unidades: GW

0.92 es el % de Paneles de Silicio en el mundo y por ello en proporción va la potencia instalada.

42 GW el último año x 0.92 = 38.64 GW

Lo que se pretende en esta variable es, mediante los datos de potencia instalada mundial de todos los tipos de células, desagregar ese dato para obtener la potencia instalada que aportó este material en cada año (por eso se multiplica por el % de tipo de célula para saber qué porcentaje se lleva, en este caso el silicio es 0,92 % sobre los paneles a nivel mundial). A partir del año 2015 lo que se desea en este modelo base es seguir con la misma tendencia de los últimos años (ver variable "Incremento de Instalación"), por lo que se hace RAMP utilizando esa relación anterior.

Tipo de Variable: Flujo

Potencia Acumulada FV de SI

Valor: Potencia Instalada FV de SI

Valor inicio: 14.577

Unidades: GW

Valor Inicial año 2008 $\rightarrow 15844 \text{ MW} \times 0,92 = 14577 \text{ MW} \rightarrow 14.577 \text{ GW}$

Tipo de Variable: Stock

Porcentaje Incremento de Instalación

Valor: 0.04

(Ver Anexo 15.3. Cálculo del Incremento de Instalación para e modelo base)

Tipo de Variable: Auxiliar

Energía Producida SI

Valor: $(\text{Potencia Acumulada FV de SI} \times 24 \times 365) / (5.5 \times 1000)$

Unidades: TWh

Lo que se pretende con esta variable es, mediante la potencia acumulada de cada año, obtener la máxima energía que podrían suministrar (generar) las células en TWh, en este caso en proporción al material estudiado en este momento. Se utiliza la proporción de las Islas Baleares 5.5 entre la Potencia Acumulada y la energía Generada.

Tipo de Variable: Auxiliar

Ton a Extraer SI > Año 2015

Valor: $(3.25187e+006 \times \text{Energía Producida SI}) / 262.26$

Unidades: Toneladas

Toneladas utilizadas en el año 2014 $\rightarrow 7.68e+006$ de extracción y producción $\times 0,40 \% \text{ FV} + 179872$ recicladas = 3251872 ton

262.26 TWh en el año 2014

Tipo de Variable: Auxiliar

Como se expuso en la variable de extracción, durante los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, la misma cogerá los datos de producción históricos, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han generado en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de energía que se necesiten para llegar a cada

escenario, se necesitará una determinada cantidad de material, dicha cantidad es el dato de salida de esta variable y el objeto de estudio del proyecto.

7.2 MODELO DEL ARSÉNICO



Fuente Imagen [52]

Elemento cuyo símbolo es As, su número atómico es 33 y su peso atómico es de 74.922.

El Arsénico es un elemento escaso en la Tierra, contiene 1,5 ppm [46].

En su forma metálica es un conductor térmico y eléctrico moderado, quebradizo (fácil de romper) y de baja ductilidad. Es uno de los pocos minerales disponibles con un 99.9999+ % de pureza [35], aunque tiene pocos usos:

Materiales láser GaAs y como agente acelerador en la manufactura de varios aparatos, células FV de GaAs, investigación espacial, y telecomunicaciones → en estado sólido.

Elaboración de vidrio → el óxido de arsénico.

Pigmentos y en juegos pirotécnicos → los sulfuros de arsénico.

Medicina → el arseniato de hidrógeno. La mayor parte de la aplicación medicinal de los compuestos de arsénico se basa en su naturaleza tóxica por eso se usa también para herbicidas e insecticidas.

Debido a ello, problemas ambientales y de salud humana siguen limitando la demanda de compuestos de arsénico.

La producción mundial de arsénico en el año 2010 fue de 52,800 toneladas [49] y en el año 2014, fueron 53.500 toneladas métricas.

En 2014, la demanda mundial de dispositivos de GaAs aumentó alrededor de un 6% a 6.25 mil millones de dólares [36], principalmente debido a una

infraestructura inalámbrica en crecimiento en Asia, y a la cuarta generación de "teléfonos inteligentes".

Aun así, la demanda de arsénico ha ido disminuyendo desde los años 70, cuando se usaban las sales de arsénico inorgánico para la producción de pesticidas. Actualmente en el mundo, un 50 % de la producción va a parar para ese uso, un 30 % se usa en la fabricación de preservantes para la madera cromada, mientras que la industria de la microelectrónica se queda con un 5 % para fabricar semiconductores de GaAs que usan los teléfonos móviles, paneles solares y diodos emisores de luz LEDs. El 15 % restante se utiliza en la fabricación de vidrio y para endurecer las aleaciones de soldaduras. La tasa de reciclaje del arsénico es un 80 % [36].

Las fuentes de importación (2010-13) en EEUU son: China, Japón, Marruecos y Bélgica [36].

Sustitutos: EL Arsénico puede obtenerse a partir de cobre, oro, y el polvo de la combustión de fundición del plomo.

Variables y datos propuestos para el modelo:

Reservas Conocidas As Anuales

Valor: IF THEN ELSE((Reservas Conocidas As Anuales-Reservas Extraídas As)<=0,0,-Reservas Extraídas As)

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 1.054e+006

Tipo de Variable: Stock

Los datos de reservas no estaban disponibles en la USGS, pero se cree que son al menos 20 veces la producción mundial.

52700 ton año 2008, *Producción de Arsénico. Fuente: USGS*

Reservas Arsénico = 52700 ton x 20 = 1054000 toneladas en el año 2008 (fuente USGS año 2010)

En la fórmula se puede ver que si las reservas decaen hasta un número menor a 0, se limita a esa cifra para que no den reservas negativas en las gráficas.

Reservas Extraídas As

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Toneladas necesarias de As al año*"% de As destinado a semiconductores"),("Ton a Extraer As > Año 2015"-Cantidad As Reciclado))

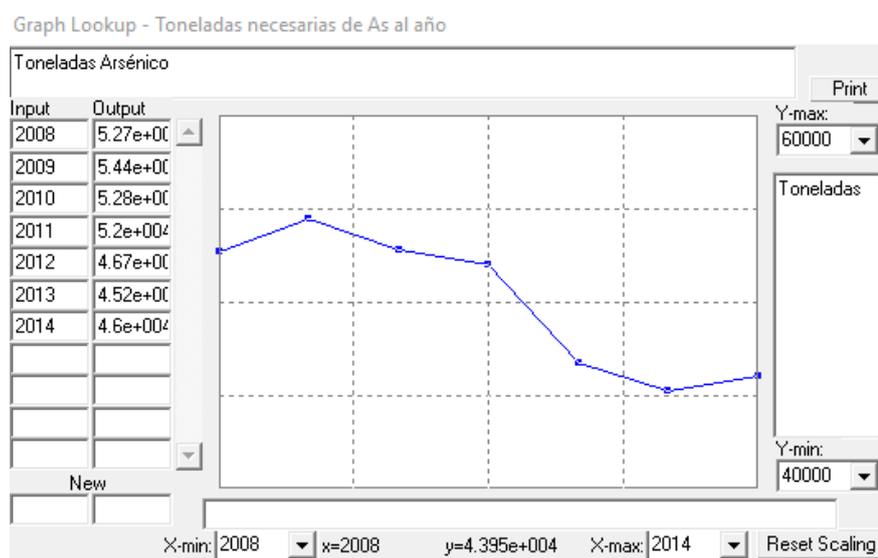
Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Flujo

Para los años anteriores que están comprendidos entre el año 2008 y 2014 coge los datos históricos de extracción-producción (puesto que son los totales de todas las industrias, se multiplica por su porcentaje de FV, lo que se utiliza dicho material para la industria solar fotovoltaica) y en años sucesivos, a partir del 2015 cogerá los datos en toneladas de material que se necesitarán para conseguir los TW instalados del escenario deseado, restándole la cantidad reciclada ese año, para obtener sólo la extracción necesaria.

Toneladas necesarias de As al Año

Valores gráfica: ((2008,40000)-
(2014,60000)],(2008,52700),(2009,54400),(2010,52800),(2011,52000),(2012,
46700),(2013,45200),(2014,46000))



Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos relativos al gráfico son la producción Mundial Total de Arsénico en los últimos años.

Fuente [36]: “EE.UU. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Enero el año 2015”

% de As destinado a semiconductores

Valor: 5/100

Unidad: Porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Producción de As Acumulada

Valor: Reservas Extraídas As

Valor Inicial: 2635

52700 (producción total industria)* 0.05 (% FV)= 2635 Toneladas producidas de arsénico en el año 2008

Unidades: Toneladas

Tipo de Variable: Stock

Producción de As Anual 0

Valor: Cantidad As Reciclado + Reservas Extraídas As

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Ciclo de Vida As

Como se expuso en otros puntos, un panel solar suele tener una vida útil entre los 25-30 años, para este caso se coge 25 años por ser los paneles de GaAs por ser los más recientes en la actualidad, no como los de silicio que llevan años fabricándose.

Tipo de Variable: Auxiliar

Cantidad As Reciclado

Valor: DELAY FIXED(Producción As Anual 0*Porcentaje de As Reciclado, Ciclo de Vida As,210.8)

Unidades: toneladas

Como los paneles tienen una duración de 25 años, hasta esta fecha no se reciclarán, con lo que a las toneladas producidas cada año se las pone un delay (retraso) para que llegada esa fecha se reciclen y siga el ciclo de producción.

Para los años anteriores a 2038, la cantidad de reciclaje que proviene de los mismos es insignificante (según USGS) por lo que para tener un modelo más cercano a la realidad puesto que algo aunque sea una cantidad pequeña se ha reciclado, se pone un 10 % de lo reciclado en el año 2008 -> producción inicial (2635 ton) x 0,80 reciclado x 0.1 = 210.8 ton

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje de As Reciclado

Valor: 80/100

Unidad: porcentaje

El reciclaje del arsénico es muy importante debido a sus altos niveles de toxicidad.

Tipo de Variable: Auxiliar

Tn As Reciclado

Valor: Cantidad As Reciclado

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 2108

El valor inicial toneladas recicladas en el año 2008 = producción inicial (2635 ton) x 0,80 reciclado = 2108 ton

Tipo de Variable: Stock

Costes Energía Reciclaje As

Valor: "Euros/ton reciclada As"*Cantidad As Reciclado

Unidades: euros

Tipo de Variable: Auxiliar

Euros Ton Reciclaje As

Valor: 11.25 (Ver Anexo 15.2. Costes de reciclaje)

Unidad: euros/ton

Tipo de Variable: Auxiliar

Costes Energéticos Totales Arsénico

Valor: Costes energía extracción y producción As + Costes energía reciclaje As

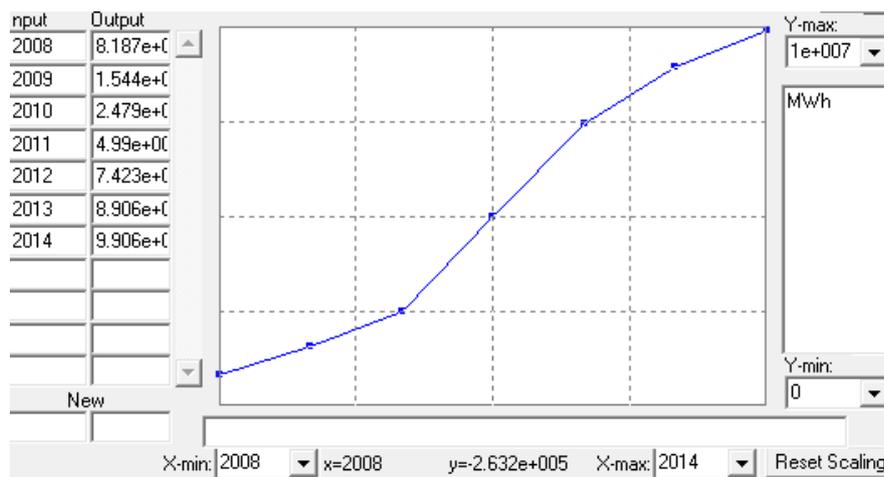
Unidad: euros

Suma aproximada de los costes totales que le cuesta la producción (reciclaje incluido) a la industria solar fotovoltaica.

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos Históricos Energía de Extracción y Producción As

Valores gráfico: ((2008,0)-(2014,1e+007]),(2008,818738),(2009,1.54423e+006),(2010,2.47863e+006),(2011,4.99e+006),(2012,7.42346e+006),(2013,8.90633e+006),(2014,9.906e+006))



Unidad: MWh

MWh energía consumida al año en extraer, suministrar y producir arsénico.

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver Anexo 15.4. Gastos energéticos de los materiales)

Costes energía extracción y producción As

Valor: IF THEN ELSE(Time<2015,Datos Históricos Energía de Extracción y Producción As*Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0,(Reservas Extraídas As*9.906e+006*Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0/2300))

Unidad: euros

En el año 2014 se extrajeron $46000 \times 0.05 = 2300$ toneladas con una energía de $9.906e+006$ MWh

Tipo de Variable: Auxiliar

Para los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, cogerá los datos de gasto históricos y los multiplicará por su precio, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han consumido para extraerse y producirse en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de material que se obtengan para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de energía para extraer y producir dichas cantidades, posteriormente se multiplica por su precio para tener los costes.

Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0

Valor: 40

Unidad: euros/MWh

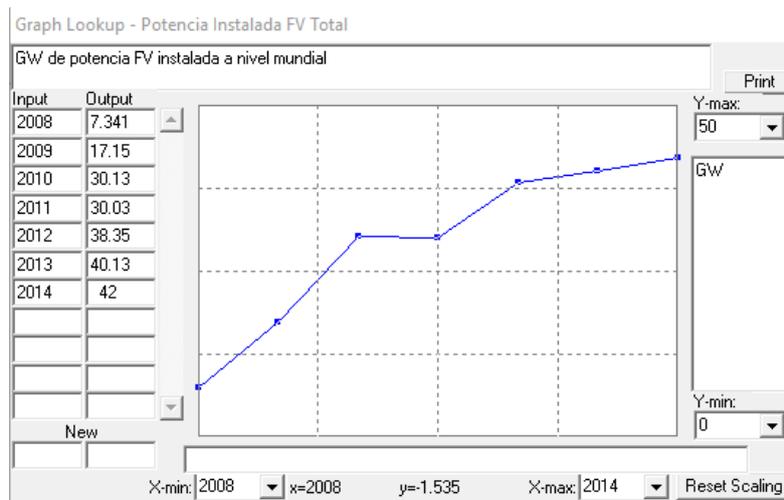
Respecto a la productividad, la energía fotovoltaica es de las más caras del mundo. Cada MWh producido ha costado 150/450€ (en comparación con 35-175€/MWh de la eólica y 40-50€/MWh de las centrales eléctrica y nucleares.[77]

Puesto que la industria FV a la hora de producir no va a utilizar su propia energía generada, se cogerá como dato el más barato de todas las energías, 40 euros de las centrales eléctricas.

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV Total

Valores gráfico: ((2008,0)-(2014,50]),(2008,7.341),(2009,17.15),(2010,30.13),(2011,30.03),(2012,38.35),(2013,40.13),(2014,42))



Unidades: GW

GW de potencia FV instalada a nivel mundial (entre todas las células FV)

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV de As

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de GaAs*Porcentaje de As Instalado),RAMP(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de GaAs*Porcentaje de As Instalado*Porcentaje Incremento de Instalación,2015,2050)+0.42)

Unidades: GW

42 GW último dato x 0.01 GaAs x 0.9914 As = 0.42

Lo que se pretende en esta variable es, mediante los datos de potencia instalada mundial de todos los tipos de células, desagregar ese dato para obtener la potencia instalada que aportó este material en cada año (por eso se multiplica por el % de tipo de célula para saber qué porcentaje se lleva en proporción y después por el % de material). A partir del año 2015 lo que se desea en este modelo base es seguir con la misma tendencia de los últimos años (ver variable "Incremento de Instalación"), por lo que se hace RAMP utilizando esa relación anterior.

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje Incremento de Instalación

Valor: 0.04

(Ver Anexo 15.3. Cálculo del Incremento de Instalación para el modelo base)

Tipo de Variable: Auxiliar

Porcentaje Instalado de GaAs

Valor: 0.01

Porcentaje de GW por tecnología (células de GaAs).

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver gráfico de sectores del Anexo 15.4)

Porcentaje de As Instalado

Valor: 0.9914

% de As que tiene un panel solar

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver Anexo 15.1. porcentaje de los materiales)

Potencia Acumulada FV de As

Valor: Potencia Instalada FV de As

Valor inicio: 0.157

Unidades: GW

Valor Inicial año 2008 $\rightarrow 15.844 \text{ GW} \times 0,01 \times 0.9914 = 0.157 \text{ GW}$

Tipo de Variable: Stock

Energía Producida As

Valor: $(\text{Potencia Acumulada FV de As} \times 24 \times 365) / (5.5 \times 1000)$

Unidades: TWh

Lo que se pretende con esta variable es, mediante la potencia acumulada de cada año, obtener la máxima energía que podrían suministrar (generar) las células en TWh, en este caso en proporción al material estudiado en este momento. Se utiliza la proporción de las Islas Baleares 5.5 entre la Potencia Acumulada y la energía Generada.

Tipo de Variable: Auxiliar

Ton a Extraer As > Año 2015

Valor: $(2510.8 * \text{Energía Producida As}) / 2.83$

Unidades: Toneladas

Toneladas utilizadas en el año 2014 \rightarrow 46000 de extracción y producción \times 0,05 % FV + 210.8 recicladas = 2510.8 ton

2.83 TWh en el año 2014

Tipo de Variable: Auxiliar

Como se expuso en la variable de extracción, durante los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, la misma cogerá los datos de producción históricos, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han generado en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de energía que se necesiten para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de material, dicha cantidad es el dato de salida de esta variable y el objeto de estudio del proyecto.

7.3. MODELO DEL GALIO



Fuente Imagen [53]

Símbolo Ga en la tabla periódica, número atómico 31 y peso atómico 69.72. Lo descubrió Lecoq de Boisbaudran en Francia en 1875. El galio es un elemento raro en la Tierra, contiene 15 ppm [46]. En la corteza continental su frecuencia es comparable con la del litio o plomo. Químicamente se asemeja al aluminio. En su

estado sólido es gris azulado cuando se expone a la atmósfera, sin embargo, el galio líquido es blanco plateado, con una superficie reflejante brillante. Su punto de congelación es más bajo que el de cualquier metal con excepción del mercurio (-39°C o -38°F) y el cesio (28.5°C u 83.3°F).

Se usa en [45]:

Termómetros de alta temperatura y manómetros → Debido a su gran intervalo de temperatura en el estado líquido.

El arseniuro de galio → Para transformar movimiento mecánico en impulsos eléctricos.

Circuitos integrados (ICs) y dispositivos optoelectrónicos → se utilizan el arseniuro de galio (GaAs) y nitruro de galio (GaN) en obleas.

Rectificadores, transistores, fotoconductores, células solares, fuentes de luz, diodos láser o máser y aparatos de refrigeración → Excelentes resultados como semiconductor.

Alrededor del 98 % de la producción mundial de galio se usa como semiconductor y tan sólo un 2 % restante se emplea en aleaciones para disminuir la temperatura de fusión de otros metales [72].

La mayor parte del consumo de galio en EE.UU, ha sido valorado con \$ 21 millones aproximadamente [36].

Los principales productores son: China, Alemania, Japón, Ucrania, Reino Unido, Estados Unidos y Eslovaquia.

Fuentes de importación (2010-13) en EEUU: Alemania, Reino Unido, China y Ucrania.

Los precios del Galio disminuyeron a lo largo del año 2014 [36], continuando el descenso de más de 2 años y con ello aumentando la demanda mundial de GaAs y productos basados en GaN, concretamente los dispositivos de GaAs incrementaron su demanda en aproximadamente un 6% debido a una creciente infraestructura inalámbrica en Asia y a la cuarta generación de los "teléfonos inteligentes" que emplean hasta 10 veces la cantidad de GaAs que un celular estándar.

Debido a las aplicaciones de defensa, militares y mercados de satélites. Se prevé que el mercado de energía de dispositivos de GaN pueda aumentar a una tasa promedio anual de casi el 29% en el año 2015.

Respecto a las células solares fotovoltaicas, en el año 2014, científicos de Alemania alcanzaron un récord de eficiencia del 21,7% para la célula diseleniuro de cobre-indio-galio (CIGS) [36]. Sin embargo, debido a un proceso de fabricación complicado que ha mantenido el coste de producción alto, y la disminución de los precios de las células solares basadas en silicio, el consumo de las células CIGS ha disminuido.

Sustitutos: El silicio es el principal competidor con GaAs en aplicaciones de células solares. Existen aplicaciones relacionadas con la defensa, debido a sus propiedades únicas, y no hay sustitutos efectivos para GaAs en estas aplicaciones. El GaAs en transistores bipolares de heterounión está siendo desafiado en algunas aplicaciones por el silicio y germanio [36].

Llegados al año 2014, vimos que la producción de galio primaria se estimó en 440 métrica toneladas- 26% más que la prevista para este año.

Los datos relativos al gráfico son la producción Mundial Total de Galio en los últimos años [45]:

	Producción
2008 →	95 ton
2009 →	78 ton
2010 →	106 ton
2011 →	216 ton
2012 →	273 ton
2013 →	280 ton
2014 →	440 ton

Fuente [36]: “EE.UU. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Enero el año 2015”

Sobre las perspectivas de demanda del material, hay que decir que debido a su escasez y su gran importancia en la industria de alta tecnología, el galio forma parte del grupo de metales para los que la Comisión Europea prevé escasez de suministro, tal y como publicó en su informe de 2010. Con estas cifras, se agrava considerablemente la carestía actual. En total y a corto plazo, se prevé un aumento de la demanda global de un 25% [47].

Aunque las células de GaAs no se utilizan ampliamente en el campo comercial, si en un futuro fuera así, podrían quedar limitadas por el Galio puesto la producción de arsénico es 53.500 toneladas métricas por año (con una reserva estimada 20 veces mayor que el galio) y la producción del galio es aproximadamente unas 200 toneladas métricas por año. Según nuestro análisis lo veremos más adelante que pasa con este problema.

Respecto al reciclaje, tenemos que se recicla el siguiente porcentaje de Galio:

Metal	Production 2012, ton/year	P _{MAX} , ton/year	Z, % or g/ton	Y, %	Known extractable amounts estimate USGS (2012) ton	Recycling rate, %	Peak production year
Gallium	280	430	20–50 g/t	35	5200	15	2026

Fuente: [48]

La chatarra del galio se recicla en Canadá, Alemania, Japón, el Reino Unido y los Estados Unidos.

Variables y datos propuestos para el modelo:

Reservas Conocidas Ga Anuales

Valor: IF THEN ELSE((Reservas Conocidas Ga Anuales-Reservas Extraídas Ga)<=0,0,-Reservas Extraídas Ga)

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 1.40149e+006

Tipo de Variable: Stock

El galio se produce en muy pequeñas concentraciones en los minerales de otros metales. La mayoría de galio se produce como un subproducto del tratamiento de la bauxita, y el resto se produce a partir de residuos de cinc-procesamiento.

Puesto que no se encontraron datos de las reservas mundiales de Galio, se obtienen mediante el contenido medio de galio en la bauxita, que es de 50 partes por millón (ppm).

World Bauxite Mine Production and Reserves:

	Mine production		Reserves ⁷
	2013	2014 ⁹	
United States	NA	NA	20,000
Australia	81,100	81,000	6,500,000
Brazil	32,500	32,500	2,600,000
China	46,000	47,000	830,000
Greece	2,100	2,100	600,000
Guinea	18,800	19,300	7,400,000
Guyana	1,710	1,800	850,000
India	15,400	19,000	540,000
Indonesia	55,700	500	1,000,000
Jamaica	9,440	9,800	2,000,000
Kazakhstan	5,400	5,500	160,000
Russia	5,320	5,300	200,000
Suriname	2,700	2,700	580,000
Venezuela	2,160	2,200	320,000
Vietnam	250	1,000	2,100,000
Other countries	4,570	4,760	2,400,000
World total (rounded)	283,000	234,000	28,000,000

Reservas de Bauxita. Datos en mil ton. Fuente: USGS

Con proporciones:

28.000.000.000 ton bauxita ----- X

1.000.000 ton bauxita ----- 50 ton galio

X = 1.400.000 ton de Galio en el año 2015

Y como queremos las reservas que quedaban en el año 2008, sumamos las cantidades de esos años:

Reservas Galio = 1.4e+006 ton (del año 2015) + 1488 ton (lo extraído en los últimos años) = 1401488 ton de galio en el año 2008

En la fórmula se puede ver que si las reservas decaen hasta un número menor a 0, se limita a esa cifra para que no den reservas negativas en las gráficas.

Reservas Extraídas Ga

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Ton Necesarias de GA al año*Porcentaje de Ga destinado a Semiconductores),(("Ton a Extraer Ga del GaAs > Año 2015"+"Ton a Extraer Ga del CIGS > Año 2015")-Cantidad Ga Reciclado))

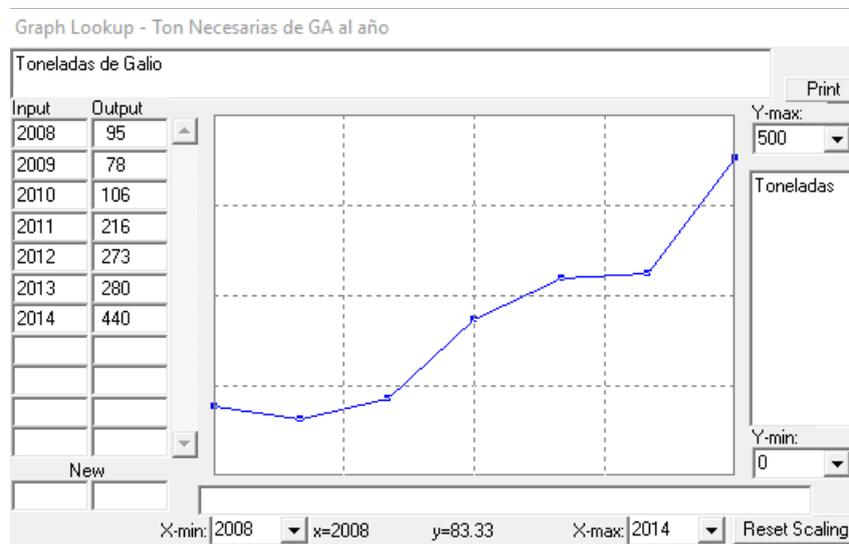
Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Flujo

Para los años anteriores que están comprendidos entre el año 2008 y 2014 coge los datos históricos de extracción-producción (puesto que son los totales de todas las industrias, se multiplica por su porcentaje de FV, lo que se utiliza dicho material para la industria solar fotovoltaica) y en años sucesivos, a partir del 2015 cogerá los datos en toneladas de material que se necesitarán para conseguir los TW instalados del escenario deseado, restándole la cantidad reciclada ese año, para obtener sólo la extracción necesaria.

Toneladas necesarias de Ga al Año

Valores gráfica: ((2008,0)-
(2014,500)],(2008,95),(2009,78),(2010,106),(2011,216),(2012,273),(2013,280)
,(2014,440))



Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos relativos al gráfico son la producción Mundial Total de Galio en los últimos años.

Porcentaje de Ga destinado a Semiconductores

Valor: 98/100

Unidad: Porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Producción de Ga Acumulada

Valor: Reservas Extraídas Ga

Valor Inicial: 93.1

95 (producción total industria año 2008) x 0.98 (% FV) = 93.1 Ton el primer año 2008 para la energía solar

Unidades: Toneladas

Tipo de Variable: Stock

Producción de Ga Anual 0

Valor: Cantidad Ga Reciclado + Reservas Extraídas Ga

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Ciclo de Vida Ga

Como se expuso en otros puntos, un panel solar suele tener una vida útil entre los 25-30 años, para este caso cogemos 25 años pues para este caso (utilidades en satélites y defensa) se necesita que no hayan perdido eficiencia, si pasaran más años ésta disminuiría.

Tipo de Variable: Auxiliar

Cantidad Ga Reciclado

Valor: DELAY FIXED(Producción Ga Anual 0*Porcentaje de Ga Reciclado, Ciclo de Vida Ga,1.4)

Unidades: toneladas

Como los paneles tienen una duración de 25 años, hasta esta fecha no se reciclarán, con lo que a las toneladas producidas cada año se las pone un delay (retraso) para que llegada esa fecha se reciclen y siga el ciclo de producción.

Para los años anteriores a 2038, la cantidad de reciclaje que proviene de los mismos es insignificante (según USGS) por lo que para tener un modelo más cercano a la realidad puesto que algo aunque sea una cantidad pequeña se ha reciclado, se pone un 10 % de lo reciclado en el año 2008 -> $93.1 \text{ producido} \times 0.15 \text{ porcentaje reciclado} \times 0.10 = 1.4 \text{ Toneladas}$

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje de Ga Reciclado

Valor: 15/100 (Ver Anexo 15.5. Reciclaje de los materiales)

Unidad: porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Tn Ga Reciclado

Valor: Cantidad Ga Reciclado

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 13.96

Valor inicial año 2008 -> $93.1 \text{ producido} \times 0.15 \text{ porcentaje reciclado} = 13.96 \text{ Toneladas}$

Tipo de Variable: Stock

Costes Energía Reciclaje Ga

Valor: "Euros/ton reciclada Ga"*Cantidad Ga Reciclado

Unidades: euros

Tipo de Variable: Auxiliar

Euros Ton Reciclaje Ga

Valor: 238.77 (Ver Anexo 15.2. Costes de reciclaje)

Unidad: euros/ton

Tipo de Variable: Auxiliar

Costes Energéticos Totales Galio

Valor: Costes energía extracción y producción Ga + Costes Energía Reciclaje Ga

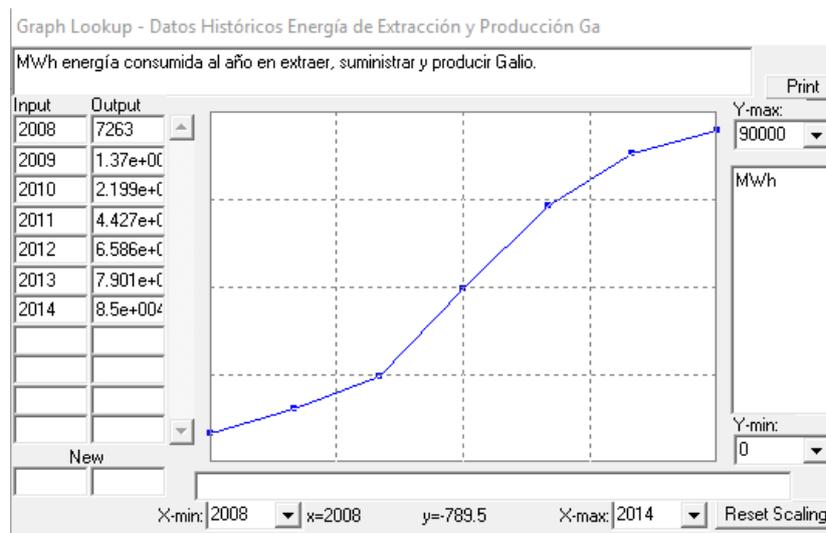
Unidad: euros

Suma aproximada de los costes totales que le cuesta la producción (reciclaje incluido) a la industria solar fotovoltaica.

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos Históricos Energía de Extracción y Producción Ga

Valores gráfico: ((2008,0)-
(2014,90000)],(2008,7263.3),(2009,13699.3),(2010,21988.6),(2011,44271.6),(
2012,65855.7),(2013,79010.7),(2014,85000))



Unidad: MWh

MWh energía consumida al año en extraer, suministrar y producir Galio.

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver Anexo 15.4. Gastos energéticos de los materiales)

Costes energía extracción y producción Ga

Valor: IF THEN ELSE(Time<2015,Datos Históricos Energía de Extracción y Producción Ga*Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0,(Reservas Extraídas Ga*85000*Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0/431.2))

Unidad: euros

En el año 2014 se extrajeron $440 \times 0.98 = 431.2$ toneladas con una energía de 85000 MWh

Tipo de Variable: Auxiliar

Para los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, cogerá los datos de gasto históricos y los multiplicará por su precio, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han consumido para extraerse y producirse en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de material que se obtengan para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de energía para extraer y producir dichas cantidades, posteriormente se multiplica por su precio para tener los costes.

Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0

Valor: 40

Unidad: euros/MWh

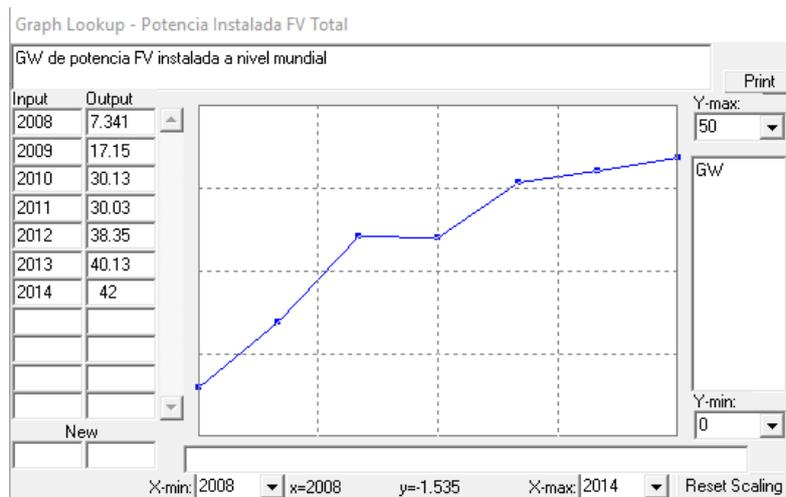
Respecto a la productividad, la energía fotovoltaica es de las más caras del mundo. Cada MWh producido ha costado 150/450€ (en comparación con 35-175€/MWh de la eólica y 40-50€/MWh de las centrales eléctrica y nucleares.[77]

Puesto que la industria FV a la hora de producir no va a utilizar su propia energía generada, se cogerá como dato el más barato de todas las energías, 40 euros de las centrales eléctricas.

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV Total

Valores gráfico: ((2008,0)-
(2014,50)],(2008,7.341),(2009,17.15),(2010,30.13),(2011,30.03),(2012,38.35),(
2013,40.13),(2014,42))



Unidades: GW

GW de potencia FV instalada a nivel mundial (entre todas las células FV)

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV de Ga en GaAs

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de GaAs*Porcentaje de Ga Instalado en GaAs),RAMP(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de GaAs*Porcentaje de Ga Instalado en GaAs*Porcentaje Incremento de Instalación,2015,2050)+0.0036)

Unidades: GW

42 GW último dato x 0.01 GaAs x 0.0086 Ga = 0.0036

Lo que se pretende en esta variable es, mediante los datos de potencia instalada mundial de todos los tipos de células, desagregar ese dato para obtener la potencia instalada que aportó este material en cada año (por eso se multiplica por el % de tipo de célula para saber qué porcentaje se lleva en proporción y después por el % de material). A partir del año 2015 lo que se desea en este modelo base es seguir con la misma tendencia de los últimos años (ver variable “Incremento de Instalación”), por lo que se hace RAMP utilizando esa relación anterior.

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje Incremento de Instalación

Valor: 0.04

(Ver Anexo 15.3. Cálculo del Incremento de Instalación para e modelo base)

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Acumulada FV de Ga en GaAs

Valor: Potencia Instalada FV de Ga en GaAs

Valor inicio: 0.00136

Unidades: GW

Valor Inicial año 2008 → 15.844 GW x 0,01 x 0.0086 = 0.00136 GW

Tipo de Variable: Stock

Porcentaje Instalado de GaAs

Valor: 0.01

Porcentaje de GW por tecnología (células de GaAs).

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver gráfico de sectores del Anexo 15.4)

Porcentaje de Ga Instalado en GaAs

Valor: 0.0086

% de Ga que tiene un panel solar respecto a células GaAs.

(Ver Anexo 15.1. porcentaje de los materiales)

Energía Producida Ga del GaAs

Valor: $(\text{Potencia Acumulada FV de Ga en GaAs} * 24 * 365) / (5.5 * 1000)$

Unidades: TWh

Lo que se pretende con esta variable es, mediante la potencia acumulada de cada año, obtener la máxima energía que podrían suministrar (generar) las células en TWh, en este caso en proporción al material estudiado en este momento. Se utiliza la proporción de las Islas Baleares 5.5 entre la Potencia Acumulada y la energía Generada.

Tipo de Variable: Auxiliar

Ton a Extraer Ga del GaAs > Año 2015

Valor: $(108.5 * \text{Energía Producida Ga del GaAs}) / 0.02451$

Unidades: Toneladas

Toneladas utilizadas en el año 2014 → 440 de extracción y producción x 0.25 Ga de GaAs x 0,98 % FV + 2.793 x 0.25 recicladas Ga en GaAs = 108.5 ton

0.02451 TWh en el año 2014

Tipo de Variable: Auxiliar

Como se expuso en la variable de extracción, durante los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, la misma cogerá los datos de producción históricos, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han generado en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de energía que se necesiten para llegar a cada

escenario, se necesitará una determinada cantidad de material, dicha cantidad es el dato de salida de esta variable y el objeto de estudio del proyecto.

0,25 es el porcentaje de cantidad de Galio que se destina a las células GaAs (Ver Anexo 15.1. Porcentajes de los materiales).

Potencia Instalada FV de Ga en CIGS

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de CIGS*Porcentaje de Ga Instalado en CIGS),RAMP(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de CIGS*Porcentaje de Ga Instalado en CIGS*Porcentaje Incremento de Instalación,2015,2050)+8.2e-005)

Unidades: GW

$42 \text{ GW último dato} \times 0.03 \text{ CIGS} \times 6.5e-005 \text{ Ga} = 0.000082$

Lo que se pretende en esta variable es, mediante los datos de potencia instalada mundial de todos los tipos de células, desagregar ese dato para obtener la potencia instalada que aportó este material en cada año (por eso se multiplica por el % de tipo de célula para saber qué porcentaje se lleva en proporción y después por el % de material). A partir del año 2015 lo que se desea en este modelo base es seguir con la misma tendencia de los últimos años (ver variable "Incremento de Instalación"), por lo que se hace RAMP utilizando esa relación anterior.

Tipo de Variable: Flujo

Potencia Acumulada FV de Ga en CIGS

Valor: Potencia Instalada FV de Ga en CIGS

Valor inicio: 3.08e-005

Unidades: GW

Valor Inicial año 2008 $\rightarrow 15.844 \text{ GW} \times 0,03 \times 0.000065 = 0.0000308 \text{ GW}$

Tipo de Variable: Stock

Porcentaje Instalado de CIGS

Valor: 0.03

Porcentaje de GW por tecnología (células de CIGS).

Porcentaje de Ga Instalado en CIGS

Valor: 6.5e-005

% de Ga que tiene un panel solar respecto a células CIGS.

(Ver Anexo 15.1. porcentaje de los materiales)

Energía Producida Ga del CIGS

Valor: $(\text{Potencia Acumulada FV de Ga en CIGS} * 24 * 365) / (5.5 * 1000)$

Unidades: TWh

Lo que se pretende con esta variable es, mediante la potencia acumulada de cada año, obtener la máxima energía que podrían suministrar (generar) las células en TWh, en este caso en proporción al material estudiado en este momento. Se utiliza la proporción de las Islas Baleares 5.5 entre la Potencia Acumulada y la energía Generada.

Tipo de Variable: Auxiliar

Ton a Extraer Ga del CIGS > Año 2015

Valor: $(325.5 * \text{Energía Producida Ga del CIGS}) / 0.0005557$

Unidades: Toneladas

Toneladas utilizadas en el año 2014 → 440 de extracción y producción x 0.75 Ga de GaAs x 0,98 % FV + 2.793 x 0.75 recicladas Ga en GaAs = 325.5 ton

0.0005557 TWh en el año 2014

Tipo de Variable: Auxiliar

Como se expuso en la variable de extracción, durante los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, la misma cogerá los datos de producción históricos, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han generado en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de energía que se necesiten para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de material, dicha cantidad es el dato de salida de esta variable y el objeto de estudio del proyecto.

0,75 es el porcentaje de cantidad de Galio que se destina a las células CIGS (Ver Anexo 15.1. Porcentajes de los materiales).

7.4. MODELO DEL INDIO



Fuente Imagen [54]

Elemento químico de símbolo In, de número atómico 49. La tierra contiene 0,049 ppm de indio por lo que es uno de los materiales más escasos que hay.

El indio se utiliza para [35]:

- Soldar alambre de plomo a transistores de germanio.
- Como componente de los semiconductores intermetálicos empleados en los transistores de germanio.
- Semiconductores con propiedades especiales hechos de arseniuro de indio, antimoniuro y fosfuro utilizados para la industria FV.
- Otros usos del indio se encuentran en la producción de recubrimientos para reducir la corrosión y el desgaste, en las aleaciones para sellado de vidrio y en las aleaciones dentales [35].

La producción de óxido de indio y estaño (ITO) continúan representando la mayor parte del consumo mundial de indio [36], aproximadamente un 65 %. Los recubrimientos ITO de película delgada se utilizan principalmente para fines de conductores eléctricos en una variedad de monitores de pantalla plana, la mayoría pantallas de cristal líquido (LCD comúnmente). Japón y la República de Corea representan la mayor parte del consumo mundial para la producción de ITO.

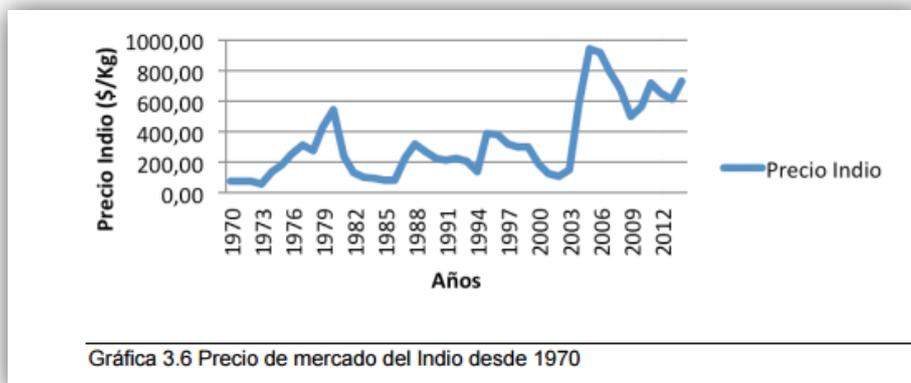
De acuerdo con informes de mercado [36], el consumo mundial de indio aumentó ligeramente en 2014 a la de 2013. Ese aumento del consumo de indio fue impulsado por una mayor demanda de televisores LCD en países en desarrollo y para los teléfonos inteligentes y las tabletas, que utilizan pequeños paneles LCD, en los países desarrollados.

Respecto al Indio en los paneles FV, hay una compañía japonesa que está en proceso de construcción de cuatro plantas solares de producción de células solares de cobre-indio-galio-seleniuro (CIGS) en la región de Tohoku de Japón. Se espera que la planta comience la producción en 2015. La empresa según los informes, era el único productor de masa de células solares CIGS y consume alrededor de 20 toneladas por año de indio [36] (esto supondría 2,5 % aproximadamente del indio mundial, para nuestro modelo escogeremos un 5 % como indio total utilizado para paneles CIGS más revestimientos ITO que también son utilizados en los módulos solares) en sus otras tres plantas solares de producción de células CIGS en Miyazaki (región de Kyushu). Una de las plantas, situada en Quingyuan, tendría una capacidad de producción de ITO de 200 toneladas por año.

Datos sobre la cantidad de producción mundial y reservas del Indio [36]:

Año:	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Toneladas Totales mundo:	570	546	609	662	782	799	820

Los precios del indio, como se puede ver, han sufrido varias oscilaciones en los últimos años:



Fuente: [52]

Según el prestigioso Instituto Fraunhofer de investigación de sistemas e innovaciones, se prevé para el año 2030 un incremento exponencial de la demanda de indio, cifrándola en 2.000 toneladas [47]. Sería muy sorprendente si este rápido aumento de la demanda no se viera reflejado en el nivel del precio.

También, al ser escasa la materia prima, se prevén problemas de suministro dado que en China, donde se encuentran los mayores yacimientos, es responsable de más del 50% de la producción mundial [47], lo que le permite controlar el sector.

Reciclaje: El indio es más comúnmente recuperado de chatarra de ITO en Japón y la República de Corea.

Sobre las células solares CIGS, es relevante decir, que seguramente su producción quede limitada debido a este material junto con el Galio, por su pequeña cantidad de reservas mundiales. Estos materiales pueden convertirse en cuellos de botella por ello es muy importante su reciclaje, lo veremos más adelante si es así.

Las fuentes de importación (2010-13) en EEUU son [36]: China, Canadá, Bélgica y Japón.

Sustitutos: La volatilidad de los precios de indio y diversas preocupaciones sobre los suministros asociados con el metal han estimulado el desarrollo de sucedáneos de revestimientos de ITO para las pantallas LCD y recubrimientos de nanotubos de carbono se han desarrollado como una alternativa a los recubrimientos de ITO en las pantallas flexibles, células solares [36] y pantallas táctiles; y poli (3,4-etileno dioxitiofeno)

(PEDOT) también se ha desarrollado como un sustituto de ITO en pantallas flexibles y los diodos emisores de luz orgánicos.

El grafeno podría para sustituir los electrodos de ITO en células solares y también se han explorado como un reemplazo para el ITO en pantallas táctiles flexibles. El arseniuro de galio puede sustituir a fosforo de indio en las células solares y en muchas aplicaciones de semiconductores.

Variables y datos propuestos para el modelo:

Reservas Conocidas In Anuales

Valor: IF THEN ELSE((Reservas Conocidas In Anuales-Reservas Extraídas In) \leq 0,0,-Reservas Extraídas In)

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 22189

Tipo de Variable: Stock

Se ha calculado que queda como máximo 20 años de reservas de Indio, basándonos en la demanda actual [73]. Por ello se ha cogido la demanda actual (820 ton/año en el año 2014, Fuente: USGS) y se ha multiplicado por 20 años:

Reservas Indio = 820 x 20 = 16400 ton año 2014 + 5789 las ton extraídas los últimos años para obtener la cifra del año 2008 = 22189 ton

En la fórmula se puede ver que si las reservas decaen hasta un número menor a 0, se limita a esa cifra para que no den reservas negativas en las gráficas.

Reservas Extraídas In

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Toneladas necesarias de In al año*"%" de In destinado a semiconductores"),("Ton a Extraer In > Año 2015"-Cantidad In Reciclado))

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Flujo

Para los años anteriores que están comprendidos entre el año 2008 y 2014 coge los datos históricos de extracción-producción (puesto que son los totales de todas las industrias, se multiplica por su porcentaje de FV, lo que se utiliza dicho material para la industria solar fotovoltaica) y en años sucesivos, a partir del 2015 cogerá los datos en toneladas de material que se necesitarán para conseguir los TW instalados del escenario deseado, restándole la cantidad reciclada ese año, para obtener sólo la extracción necesaria.

Toneladas necesarias de In al Año

Valores gráfica: ((2008,500)-
(2014,900]),(2008,570),(2009,546),(2010,609),(2011,662),(2012,782),(2013,799),(2014,820))



Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos relativos al gráfico son la producción Mundial Total de Indio en los últimos años.

Fuente [36]: “EE.UU. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Enero el año 2015”

% de In destinado a semiconductores

Valor: 5/100

Unidad: Porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Ese porcentaje es destinado sólo a semiconductores de la energía FV.

Producción de In Acumulada

Valor: Reservas Extraídas In

Valor Inicial: 28.5

Unidades: Toneladas

570 (producción total industria año 2008) \times 0.05 (%FV) = 28.5 Ton el primer año 2008 para la energía solar.

Tipo de Variable: Stock

Producción de In Anual 0

Valor: Cantidad In Reciclado + Reservas Extraídas In

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Ciclo de Vida In

Este tipo de paneles solares CIGS tiene una vida útil de 25 años. Con lo que para el Indio pondremos esa cantidad.

Tipo de Variable: Auxiliar

Cantidad In Reciclado

Valor: DELAY FIXED(Producción In Anual 0*Porcentaje de In Reciclado, Ciclo de Vida In,1.425)

Unidades: toneladas

Como los paneles tienen una duración de 25 años, hasta esta fecha no se reciclarán, con lo que a las toneladas producidas cada año se las pone un delay (retraso) para que llegada esa fecha se reciclen y siga el ciclo de producción.

Para los años anteriores a 2038, la cantidad de reciclaje que proviene de los mismos es insignificante (según USGS) por lo que para tener un modelo más cercano a la realidad puesto que algo aunque sea una cantidad pequeña se ha reciclado, se pone un 10 % de lo reciclado en el año 2008 -> $28.5 \times 0.5 \times 0.10 = 1.425$ Toneladas

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje de In Reciclado

Valor: 50/100 (Ver Anexo 15.5. Reciclaje de los materiales)

Unidad: porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Tn In Reciclado

Valor: Cantidad In Reciclado

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 14.25

28.5 (producción año 2008) $\times 0.50 = 14.25$ Toneladas recicladas en el año 2008.

Tipo de Variable: Stock

Costes Energía Reciclaje In

Valor: "Euros/ton reciclada In"*Cantidad In Reciclado

Unidades: euros

Tipo de Variable: Auxiliar

Euros Ton Reciclaje In

Valor: 0.00702 (Ver Anexo 15.2. Costes de reciclaje)

Unidad: euros/ton

Tipo de Variable: Auxiliar

Costes Energéticos Totales Indio

Valor: Costes energía extracción y producción In + Costes energía reciclaje In

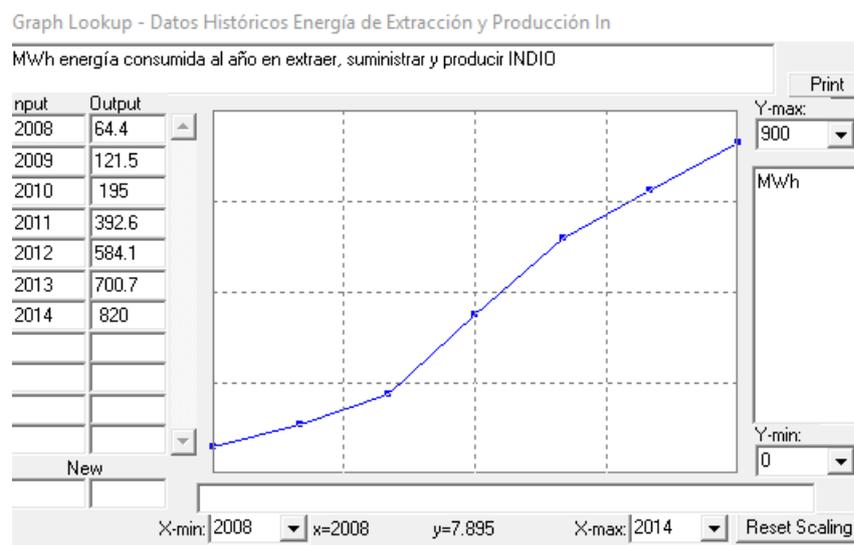
Unidad: euros

Suma aproximada de los costes totales que le cuesta la producción (reciclaje incluido) a la industria solar fotovoltaica.

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos Históricos Energía de Extracción y Producción In

Valores gráfico: ((2008,0)-
(2014,900]),(2008,64.4),(2009,121.5),(2010,195),(2011,392.6),(2012,584.1),(2013,700.7),(2014,820))



Unidad: MWh

MWh energía consumida al año en extraer, suministrar y producir Indio.

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver Anexo 15.4. Gastos energéticos de los materiales)

Costes energía extracción y producción In

Valor: IF THEN ELSE(Time<2015,Datos Históricos Energía de Extracción y Producción In*Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0,(Reservas Extraídas In*820*Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0/41))

Unidad: euros En el año 2014 se extrajeron $820 \times 0.05 = 41$ toneladas con una energía de 820 MWh

Tipo de Variable: Auxiliar

Para los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, cogerá los datos de gasto históricos y los multiplicará por su precio, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han consumido para extraerse y producirse en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de material que se obtengan para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de energía para extraer y producir dichas cantidades, posteriormente se multiplica por su precio para tener los costes.

Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0

Valor: 40

Unidad: euros/MWh

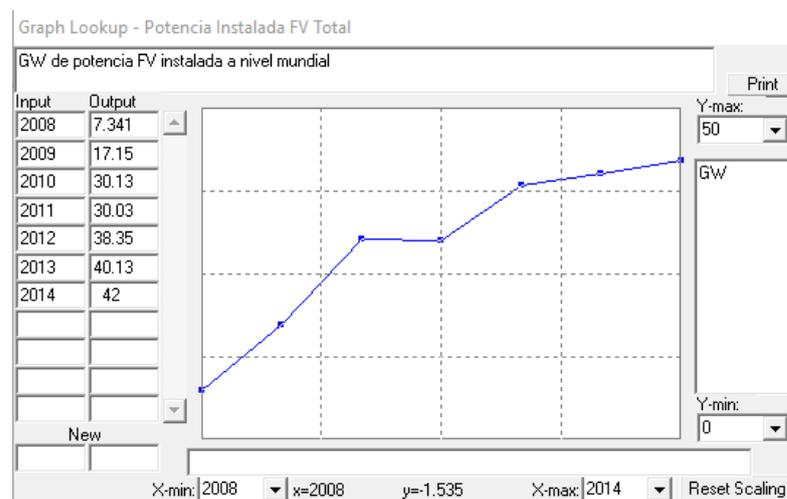
Respecto a la productividad, la energía fotovoltaica es de las más caras del mundo. Cada MWh producido ha costado 150/450€ (en comparación con 35-175€/MWh de la eólica y 40-50€/MWh de las centrales eléctrica y nucleares.[77]

Puesto que la industria FV a la hora de producir no va a utilizar su propia energía generada, se cogerá como dato el más barato de todas las energías, 40 euros de las centrales eléctricas.

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV Total

Valores gráfico: ((2008,0)-
(2014,50]),(2008,7.341),(2009,17.15),(2010,30.13),(2011,30.03),(2012,38.35),(
2013,40.13),(2014,42))



Unidades: GW

GW de potencia FV instalada a nivel mundial (entre todas las células FV)

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV de In

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de CIGS*Porcentaje de In Instalado),RAMP(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de CIGS*Porcentaje de In Instalado*Porcentaje Incremento de Instalación,2015,2050)+3.28e-005)

Unidades: GW

42 GW último dato x 0.03 CIGS x 0.000026 In = 3.28e-005

Lo que se pretende en esta variable es, mediante los datos de potencia instalada mundial de todos los tipos de células, desagregar ese dato para obtener la potencia instalada que aportó este material en cada año (por eso se multiplica por el % de tipo de célula para saber qué porcentaje se lleva en proporción y después por el % de material). A partir del año 2015 lo que se desea en este modelo base es seguir con la misma tendencia de los últimos años (ver variable “Incremento de Instalación”), por lo que se hace RAMP utilizando esa relación anterior.

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje Incremento de Instalación

Valor: 0.04

(Ver Anexo 15.3. Cálculo del Incremento de Instalación para e modelo base)

Tipo de Variable: Auxiliar

Porcentaje Instalado de CIGS

Valor: 0.03

Porcentaje de GW por tecnología (células de CIGS).

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver gráfico de sectores del Anexo 15.4)

Porcentaje de In Instalado

Valor: 2.6e-005

% de cantidad de In que contiene un panel solar en la célula CIGS.

Potencia Acumulada FV de In

Valor: Potencia Instalada FV de In

Valor inicio: 1.2e-005

Unidades: GW

Valor Inicial año 2008 --> 15844 MW x 0,03 x 0.000026 y entre 1000 para pasarlo a GW --> 0.000012 GW

Tipo de Variable: Stock

Energía Producida In

Valor: (Potencia Acumulada FV de In*24*365)/(5.5*1000)

Unidades: TWh

Lo que se pretende con esta variable es, mediante la potencia acumulada de cada año, obtener la máxima energía que podrían suministrar (generar) las células en TWh, en este caso en proporción al material estudiado en este momento. Se utiliza la proporción de las Islas Baleares 5.5 entre la Potencia Acumulada y la energía Generada.

Tipo de Variable: Auxiliar

Ton a Extraer In > Año 2015

Valor: (42.425*Energía Producida In)/0.0002218

Unidades: Toneladas

Toneladas utilizadas en el año 2014 --> 820 de extracción y producción x 0,05 % FV + 1.425 recicladas = 42.425 ton

0.0002218 TWh en el año 2014

Tipo de Variable: Auxiliar

Como se expuso en la variable de extracción, durante los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, la misma cogerá los datos de producción históricos, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han generado en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de energía que se necesiten para llegar a cada

escenario, se necesitará una determinada cantidad de material, dicha cantidad es el dato de salida de esta variable y el objeto de estudio del proyecto.

7.5. MODELO DEL SELENIO



Fuente Imagen [55]

Elemento químico cuyo símbolo es Se, número atómico 34 y peso atómico 78.96. Sus propiedades son semejantes a las del telurio. En la Tierra hay 0,05 ppm de selenio, es un material escaso.

Los empleos más importantes del selenio son [35]:

- El proceso de fotocopiado xerográfico
- La decoloración de vidrios teñidos por compuestos de hierro
- Como pigmento en plásticos, pinturas, barnices, vidrio y cerámica y tintas.
- Exposímetros fotográficos
- como un suplemento dietético humano y en champús anticaspa.
- Como aditivo metalúrgico que mejora la capacidad de ciertos aceros para ser maquinados.
- En módulos fotovoltaicos de película delgada CIGS (cobre, indio, galio diseleniuro).
- Su utilización en rectificadores ha disminuido por el mayor empleo del silicio y el germanio en esta aplicación.

Las estimaciones para el consumo mundial son los siguientes: la metalurgia, 40%; la fabricación de vidrio, 25%; agricultura, 10% productos químicos y pigmentos, 10%; la electrónica [36] 10% (cogeremos un 7% para los semiconductores FV de nuestro modelo); y otros usos, 5%.

Producción Mundial de Selenio [36]:

Años	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Producción (toneladas)	1510	2280	2120	2980	2900	3000	2900

El consumo de selenio en las células solares CIGS disminuyó en 2014, debido a mejoras en los paneles solares basadas en silicio que continuaron para que sean más rentables que las células solares CIGS, pero actualmente hay equilibrio entre oferta y demanda de selenio. No obstante y debido a la enorme necesidad de materias primas chinas, se espera una fuerte subida de compras occidentales de este semimetal. Además, las posibilidades de reciclaje del selenio son muy limitadas, sobre el 5 % [48]. Por lo tanto, una demanda creciente implicará un aumento de precio a medio y largo plazo [47].

Las fuentes de importación (2010-13) en EEUU son: Japón, China, Bélgica y Filipinas.

Sustitutos: El Silicio de gran pureza ha reemplazado al selenio en los rectificadores de alta tensión, también en las células solares fotovoltaicas pues el silicio amorfo y telurio de cadmio son los dos principales competidores con CIGS en células fotovoltaicas de película delgada [36].

Otros sustitutos incluyen óxido de cerio, ya sea como un colorante o decolorante para el vidrio; telurio en pigmentos y caucho; bismuto, plomo y telurio en aleaciones de maquinado libre.

Variables y datos propuestos para el modelo:

Reservas Conocidas Se Anuales

Valor: IF THEN ELSE((Reservas Conocidas Se Anuales-Reservas Extraídas Se)<=0,0,-Reservas Extraídas Se)

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 137690

Tipo de Variable: Stock

Reservas de Selenio, *fuentes USGS año 2015:*

	Refinery production ²		Reserves ³
	2013	2014 ^e	
United States	W	W	10,000
Belgium	200	200	—
Canada	159	150	6,000
Chile	75	70	25,000
China	NA	NA	26,000
Finland	100	75	—
Germany	700	700	—
Japan	760	760	—
Peru	50	40	13,000
Poland	90	80	3,000
Russia	150	150	20,000
Other countries	⁴ 50	⁴ 50	<u>21,000</u>
World total (rounded)	⁵ NA	⁵ NA	120,000

Reservas año 2008 → 88000 toneladas

Reservas año 2010 → 93000 toneladas

Reservas año 2013 → 120000 toneladas

Reservas año 2012 → 98000 toneladas

Reservas año 2014 → 120000 toneladas

Reservas selenio = 120000 ton fuente USGS año 2014 + 17690 ton producidas de los últimos años = 137690 toneladas en el año 2008

En la fórmula se puede ver que si las reservas decaen hasta un número menor a 0, se limita a esa cifra para que no den reservas negativas en las gráficas.

Reservas Extraídas Se

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Toneladas necesarias de Se al año*Porcentaje de Se destinado a Semiconductores),("Ton a Extraer Se > Año 2015"-Cantidad Se Reciclado))

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Flujo

Para los años anteriores que están comprendidos entre el año 2008 y 2014 coge los datos históricos de extracción-producción (puesto que son los totales de todas las industrias, se multiplica por su porcentaje de FV, lo que se utiliza dicho material para la industria solar fotovoltaica) y en años sucesivos, a partir del 2015 cogerá los datos en toneladas de material que se necesitarán para conseguir los TW instalados del escenario deseado, restándole la cantidad reciclada ese año, para obtener sólo la extracción necesaria.

Toneladas necesarias de Se al Año

Valores gráfica: ((2008,1000)-
(2014,3100)),(2008,1510),(2009,2280),(2010,2120),(2011,2980),(2012,2900),(
2013,3000),(2014,2900))



Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos relativos al gráfico son la producción Mundial Total de Selenio en los últimos años.

Fuente [36]: "EE.UU. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Enero el año 2015"

Porcentaje de Se destinado a semiconductores

Valor: 7/100

Unidad: Porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Este porcentaje es destinado sólo a semiconductores de la energía solar FV.

Producción de Se Acumulada

Valor: Reservas Extraídas Se

Valor Inicial: 105.7

Unidades: Toneladas

$1510 \text{ (ton producción)} \times 0.07 \text{ (\% FV)} = 105.7 \text{ Ton el primer año 2008.}$

Tipo de Variable: Stock

Producción de Se Anual 0

Valor: Cantidad Se Reciclado + Reservas Extraídas Se

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Ciclo de Vida Se

Este tipo de paneles solares CIGS tiene una vida útil de 25 años. Con lo que para el Selenio se pondrá esa cantidad.

Tipo de Variable: Auxiliar

Cantidad Se Reciclado

Valor: DELAY FIXED(Producción Se Anual 0*Porcentaje de Se Reciclado, Ciclo de Vida Se,4.228)

Unidades: toneladas

Como los paneles tienen una duración de 25 años, hasta esta fecha no se reciclarán, con lo que a las toneladas producidas cada año se las pone un delay (retraso) para que llegada esa fecha se reciclen y siga el ciclo de producción.

Para los años anteriores a 2038, la cantidad de reciclaje que proviene de los mismos es insignificante (según USGS) por lo que para tener un modelo más cercano a la realidad puesto que algo aunque sea una cantidad pequeña se ha reciclado, se pone un 10 % de lo reciclado en el año 2008 -> producción inicial (105.7 ton) x 0,40 reciclado x 0.10 = 4.228 ton

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje de Se Reciclado

Valor: 40/100 (Ver Anexo 15.5. Reciclaje de los materiales)

Unidad: porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Tn Se Reciclado

Valor: Cantidad Se Reciclado

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 42.28

Valor inicial toneladas recicladas en el año 2008 = producción inicial (105.7 ton) x 0,40 reciclado = 42.28 ton

Tipo de Variable: Stock

Costes Energía Reciclaje Se

Valor: "Euros/ton reciclada Se"*Cantidad Se Reciclado

Unidades: euros

Tipo de Variable: Auxiliar

Euros Ton Reciclaje Se

Valor: 0.0999 (Ver Anexo 15.2. Costes de reciclaje)

Unidad: euros/ton

Tipo de Variable: Auxiliar

Costes Energéticos Totales Selenio

Valor: Costes energía extracción y producción Se + Costes Energía Reciclaje Se

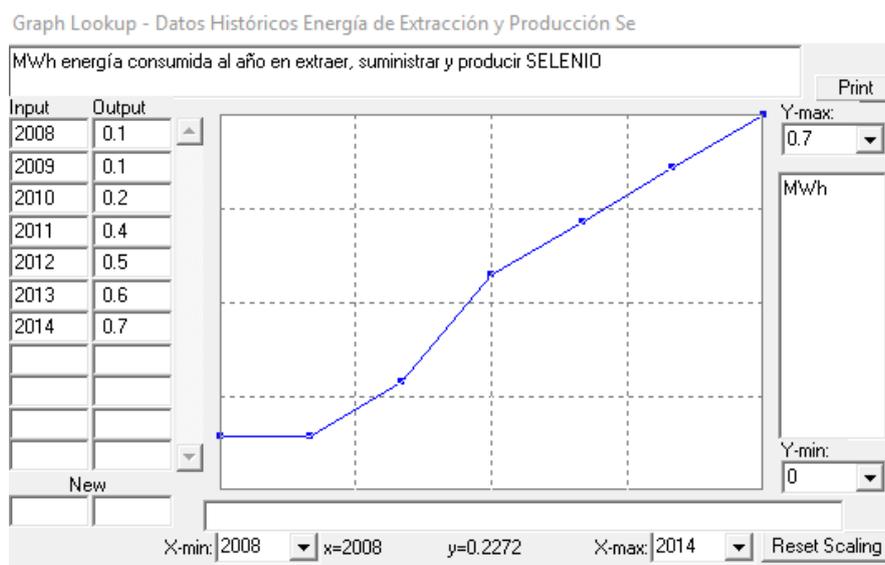
Unidad: euros

Suma aproximada de los costes totales que le cuesta la producción (reciclaje incluido) a la industria solar fotovoltaica.

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos Históricos Energía de Extracción y Producción Se

Valores gráfico ((2008,0)-(2014,0.7]),(2008,0.1),(2009,0.1),(2010,0.2),(2011,0.4),(2012,0.5),(2013,0.6),(2014,0.7))



Unidad: MWh

MWh energía consumida al año en extraer, suministrar y producir Selenio.

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver Anexo 15.4. Gastos energéticos de los materiales)

Costes energía extracción y producción Se

Valor: IF THEN ELSE(Time<2015,Datos Históricos Energía de Extracción y Producción Se*Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0,(Reservas Extraídas Se*0.7*Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0/203))

Unidad: euros

En el año 2014 se extrajeron $2900 \times 0.07 = 203$ toneladas con una energía de 0.7 MWh

Tipo de Variable: Auxiliar

Para los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, cogerá los datos de gasto históricos y los multiplicará por su precio, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han consumido para extraerse y producirse en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de material que se obtengan para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de energía para extraer y producir dichas cantidades, posteriormente se multiplica por su precio para tener los costes.

Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0

Valor: 40

Unidad: euros/MWh

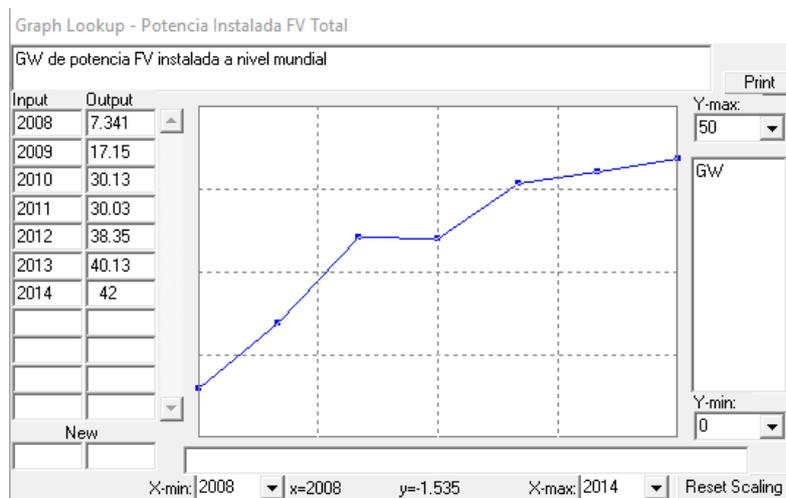
Respecto a la productividad, la energía fotovoltaica es de las más caras del mundo. Cada MWh producido ha costado 150/450€ (en comparación con 35-175€/MWh de la eólica y 40-50€/MWh de las centrales eléctrica y nucleares.[77]

Puesto que la industria FV a la hora de producir no va a utilizar su propia energía generada, se cogerá como dato el más barato de todas las energías, 40 euros de las centrales eléctricas.

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV Total

Valores gráfico: ((2008,0)-
(2014,50]),(2008,7.341),(2009,17.15),(2010,30.13),(2011,30.03),(2012,38.35),(
2013,40.13),(2014,42))



Unidades: GW

GW de potencia FV instalada a nivel mundial (entre todas las células FV)

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV de Se

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de CIGS*Porcentaje de Se Instalado),RAMP(Potencia Instalada FV

Total*Porcentaje Instalado de CIGS*Porcentaje de Se Instalado*Porcentaje Incremento de Instalación,(2015,2050)+0.000466)

Unidades: GW

42 GW último dato x 0.03 CIGS x 0.00037 Se = 0.000466

Lo que se pretende en esta variable es, mediante los datos de potencia instalada mundial de todos los tipos de células, desagregar ese dato para obtener la potencia instalada que aportó este material en cada año (por eso se multiplica por el % de tipo de célula para saber qué porcentaje se lleva en proporción y después por el % de material). A partir del año 2015 lo que se desea en este modelo base es seguir con la misma tendencia de los últimos años (ver variable "Incremento de Instalación"), por lo que se hace RAMP utilizando esa relación anterior.

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje Incremento de Instalación

Valor: 0.04

(Ver Anexo 15.3. Cálculo del Incremento de Instalación para el modelo base)

Tipo de Variable: Auxiliar

Porcentaje Instalado de CIGS

Valor: 0.03

Porcentaje de GW por tecnología (células de CIGS).

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver gráfico de sectores del Anexo 15.4)

Porcentaje de In Instalado

Valor: 0.00037

% de cantidad de Se que contiene un panel solar en la célula CIGS.

Potencia Acumulada FV de Se

Valor: Potencia Instalada FV de Se

Valor inicio: 0.000176

Unidades: GW

Valor Inicial año 2008 $\rightarrow 15.844 \text{ GW} \times 0,03 \times 0.00037 = 0.000176 \text{ GW}$

Tipo de Variable: Stock

Energía Producida Se

Valor: $(\text{Potencia Acumulada FV de Se} \times 24 \times 365) / (5.5 \times 1000)$

Unidades: TWh

Lo que se pretende con esta variable es, mediante la potencia acumulada de cada año, obtener la máxima energía que podrían suministrar (generar) las células en TWh, en este caso en proporción al material estudiado en este momento. Se utiliza la proporción de las Islas Baleares 5.5 entre la Potencia Acumulada y la energía Generada.

Tipo de Variable: Auxiliar

Ton a Extraer Se > Año 2015

Valor: $(207.23 \times \text{Energía Producida Se}) / 0.003164$

Unidades: Toneladas

Toneladas utilizadas en el año 2014 $\rightarrow 2900$ de extracción y producción $\times 0,07 \%$
FV + 4.228 recicladas = 207.23 ton

0.003164 TWh en el año 2014

Tipo de Variable: Auxiliar

Como se expuso en la variable de extracción, durante los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, la misma cogerá los datos de producción históricos, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han generado en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de energía que se necesiten para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de material, dicha cantidad es el dato de salida de esta variable y el objeto de estudio del proyecto.

7.6. MODELO DEL COBRE



Fuente Imagen [56]

Elemento químico de símbolo Cu, con número atómico 29. La Tierra contiene 50 ppm de este material, es de los materiales más comunes que hay. Un metal comparativamente pesado, tiene una densidad de 8.96 g/cm^3 a 20°C , mientras que el del tipo comercial varía con el método de manufactura. El cobre no es magnético pero es paramagnético y su conductividad térmica y eléctrica son muy altas. La fuerza del cobre está acompañada de una alta ductilidad. Por lo que su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas. El cobre fue uno de los primeros metales usados por los humanos para hacer utensilios. En la actualidad se utiliza sobre todo para cableado como conductor eléctrico, pero en este proyecto se tratará sólo el porcentaje de cobre usado en los módulos fotovoltaicos CIGS.

Más ampliamente utilizado en [35]:

- La prevención de la putrefacción de la madera, telas, cuerdas y redes de pesca.
- La agricultura, en especial como fungicidas e insecticidas.
- Como pigmentos; en soluciones galvanoplásticas; en celdas primarias; como mordentes en teñido, y como catalizadores.

Productos de aleaciones de cobre se utilizaron en la construcción de edificios, un 43%; en eléctrica y productos electrónicos un 19% (del 19% para productos electrónicos, entre ellos cogeremos un 7% para los paneles solares sin contar el cableado de las instalaciones, sólo el contenido de material en las células CIGS); equipo de transporte, 19%; del consumidor y productos en general, 12%; y maquinaria y equipo industrial, 7% [36].

El Grupo Internacional de Estudio del Cobre (GIEC), prevé que en 2014, la producción mundial de cobre refinado aumente en un 2,6% y que el consumo aumente en un 5,2% [36].

El cobre natural, antes abundante en Estados Unidos, se extrae ahora sólo en Michigan. La producción minera de EE.UU. aumentó alrededor de un 14% en 2014, debido principalmente a un aumento significativo en la producción en Arizona, Nuevo México y Utah. El grado del mineral empleado en la producción de cobre ha ido disminuyendo regularmente, conforme se han agotado los minerales más ricos y ha crecido la demanda de cobre. Hay grandes cantidades de cobre en la Tierra para uso futuro si se utilizan los minerales de los grados más bajos, y no hay probabilidad de que se agoten durante un largo periodo de tiempo por lo que en el estudio de las células CIGS no se prevé que haya problema de escasez y no limitaría la producción de las mismas, sin embargo habrá que estudiar más adelante si será así, en 2014, la evaluación global de la USGS [36] indicó que sobre este material queda aún mucha cantidad de recursos por descubrir.

Reciclaje [36]: Del total de cobre recuperado de desechos (incluyendo la chatarra de aluminio y la base de níquel), fueron recuperados de tubos y planchas un 75%; fabricantes diversos, fundiciones y plantas químicas, un 10%; fabricantes de lingotes un 10% recuperado; y fundiciones de cobre y refinerías, 5%. Toda la chatarra de cobre contribuyó con alrededor del 32% del suministro de cobre [36] de EE.UU. en el último año 2015. Según el artículo [48] el porcentaje de cobre reciclado es actualmente un 60 %.

Las fuentes de importación (2010-13) en EEUU son [36]: Chile, Canadá, México y Perú.

Sustitutos: sustitutos de aluminio por cobre en el cable de alimentación, equipos eléctricos, radiadores de automóviles, y la refrigeración y el tubo de refrigeración; titanio y acero se utilizan en intercambiadores de calor; sustitutos de fibra óptica para el cobre en aplicaciones de telecomunicaciones. Respecto al caso de la red de electrificación y módulos en el sector fotovoltaico, el grafeno.

Variables y datos propuestos para el modelo:

Reservas Conocidas Cu Anuales

Valor: IF THEN ELSE((Reservas Conocidas Cu Anuales-Reservas Extraídas Cu)<=0,0,-Reservas Extraídas Cu)

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 8.172e+008

Tipo de Variable: Stock

Reservas de Cobre, fuente USGS año 2015, datos en mil ton:

	Mine production		Reserves ⁷
	2013	2014 ^e	
United States	1,250	1,370	35,000
Australia	990	1,000	⁸ 93,000
Canada	632	680	11,000
Chile	5,780	5,800	209,000
China	1,600	1,620	30,000
Congo (Kinshasa)	970	1,100	20,000
Indonesia	504	400	25,000
Kazakhstan	446	430	6,000
Mexico	480	520	38,000
Peru	1,380	1,400	68,000
Poland	429	425	28,000
Russia	833	850	30,000
Zambia	760	730	20,000
Other countries	2,200	2,400	90,000
World total (rounded)	18,300	18,700	700,000

Año 2010 --> 690000000 toneladas

Año 2012 --> 690000000 toneladas

Año 2014 --> 700000000 toneladas

Reservas de cobre = 700000000 ton (fuente USGS año 2014) + suma de lo extraído en los últimos años 117200000 = 817200000 toneladas año 2008

En la fórmula se puede ver que si las reservas decaen hasta un número menor a 0, se limita a esa cifra para que no den reservas negativas en las gráficas.

Reservas Extraídas Cu

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Toneladas necesarias de Cu al año*" % de Cu destinado a semiconductores"),("Ton a Extraer Cu > Año 2015"-Cantidad Cu Reciclado))

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Flujo

Para los años anteriores que están comprendidos entre el año 2008 y 2014 coge los datos históricos de extracción-producción (puesto que son los totales de todas las industrias, se multiplica por su porcentaje de FV, lo que se utiliza dicho material para la industria solar fotovoltaica) y en años sucesivos, a partir del 2015 cogerá los datos en toneladas de material que se necesitarán para conseguir los TW instalados del escenario deseado, restándole la cantidad reciclada ese año, para obtener sólo la extracción necesaria.

Toneladas necesarias de Cu al Año

Valores gráfica: ((2008,0)-(2014,2e+007)),(2008,1.54e+007),(2009,1.59e+007),(2010,1.59e+007),(2011,1.61e+007),(2012,1.69e+007),(2013,1.83e+007),(2014,1.87e+007))



Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos relativos al gráfico son la producción Mundial Total de cobre en los últimos años.

Fuente [36]: "EE.UU. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Enero el año 2015"

Porcentaje de Cu destinado a semiconductores

Valor: 7/100

Unidad: Porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Producción de Cu Acumulada

Valor: Reservas Extraídas Cu

Valor Inicial: 1.078e+006

Unidades: Toneladas

$1.54e+007$ (ton producidas total industrias) \times 0.07 (% FV) = 1078000 Ton el primer año 2008

Tipo de Variable: Stock

Producción de Cu Anual O

Valor: Cantidad Cu Reciclado + Reservas Extraídas Cu

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Ciclo de Vida Cu

Este tipo de paneles solares CIGS tiene una vida útil de 25 años. Con lo que para el Cobre se pondrá esa cantidad.

Tipo de Variable: Auxiliar

Cantidad Cu Reciclado

Valor: DELAY FIXED(Producción Cu Anual O*Porcentaje de Cu Reciclado, Ciclo de Vida Cu,64680)

Unidades: toneladas

Como los paneles tienen una duración de 25 años, hasta esta fecha no se reciclarán, con lo que a las toneladas producidas cada año se las pone un delay (retraso) para que llegada esa fecha se reciclen y siga el ciclo de producción.

Para los años anteriores a 2038, la cantidad de reciclaje que proviene de los mismos es insignificante (según USGS) por lo que para tener un modelo más cercano a la realidad puesto que algo aunque sea una cantidad pequeña se ha reciclado, se pone un 10 % de lo reciclado en el año 2008 -> producción inicial (1078000 ton) x 0,60 reciclado x 0.10 = 64680 ton

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje de Cu Reciclado

Valor: 60/100 (Ver Anexo 15.5. Reciclaje de los materiales)

Unidad: porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Tn Cu Reciclado

Valor: Cantidad Cu Reciclado

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 646800

Valor inicial toneladas recicladas en el año 2008 = producción inicial (1078000 ton) x 0,60 reciclado = 646800 ton

Tipo de Variable: Stock

Costes Energía Reciclaje Cu

Valor: "Euros/ton reciclada Cu"*Cantidad Cu Reciclado

Unidades: euros

Tipo de Variable: Auxiliar

Euros Ton Reciclaje Cu

Valor: 269.892 (Ver Anexo 15.2. Costes de reciclaje)

Unidad: euros/ton

Tipo de Variable: Auxiliar

Costes Energéticos Totales Cobre

Valor: Costes energía extracción y producción Cu + Costes energía reciclaje Cu

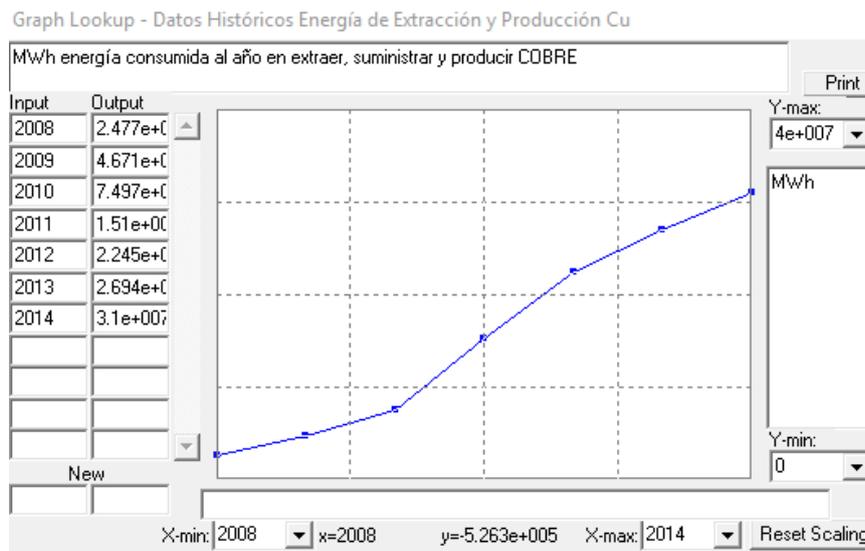
Unidad: euros

Suma aproximada de los costes totales que le cuesta la producción (reciclaje incluido) a la industria solar fotovoltaica.

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos Históricos Energía de Extracción y Producción Cu

Valores gráfico: ((2008,0)-(2014,4e+007)],(2008,2.47653e+006),(2009,4.671e+006),(2010,7.49739e+006),(2011,1.50951e+007),(2012,2.24546e+007),(2013,2.694e+007),(2014,3.1e+007))



Unidad: MWh

MWh energía consumida al año en extraer, suministrar y producir Cobre.

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver Anexo 15.4. Gastos energéticos de los materiales)

Costes energía extracción y producción Cu

Valor: IF THEN ELSE(Time<2015,Datos Históricos Energía de Extracción y Producción Cu*Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0,(Reservas Extraídas Cu*3.1e+007*Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0/1.309e+006))

Unidad: euros

En el año 2014 se extrajeron $1.87e+007 \times 0.07 = 1309000$ toneladas con una energía de $3.1e+007$ MWh

Tipo de Variable: Auxiliar

Para los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, cogerá los datos de gasto históricos y los multiplicará por su precio, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han consumido para extraerse y producirse en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de material que se obtengan para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de energía para extraer y producir dichas cantidades, posteriormente se multiplica por su precio para tener los costes.

Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0

Valor: 40

Unidad: euros/MWh

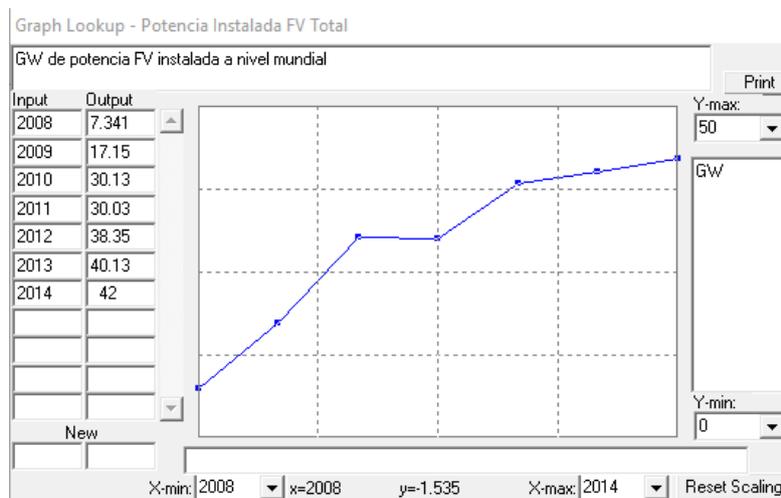
Respecto a la productividad, la energía fotovoltaica es de las más caras del mundo. Cada MWh producido ha costado 150/450€ (en comparación con 35-175€/MWh de la eólica y 40-50€/MWh de las centrales eléctrica y nucleares.[77]

Puesto que la industria FV a la hora de producir no va a utilizar su propia energía generada, se cogerá como dato el más barato de todas las energías, 40 euros de las centrales eléctricas.

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV Total

Valores gráfico: ((2008,0)-
(2014,50]),(2008,7.341),(2009,17.15),(2010,30.13),(2011,30.03),(2012,38.35),(
2013,40.13),(2014,42))



Unidades: GW

GW de potencia FV instalada a nivel mundial (entre todas las células FV)

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV de Cu

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de CIGS*Porcentaje de Cu Instalado),RAMP(Potencia Instalada FV

Total*Porcentaje Instalado de CIGS*Porcentaje de Cu Instalado*Porcentaje Incremento de Instalación,(2015,2050)+1.26)

Unidades: GW

42 GW último dato x 0.03 CIGS x 0.9996 Cu = 1.26

Lo que se pretende en esta variable es, mediante los datos de potencia instalada mundial de todos los tipos de células, desagregar ese dato para obtener la potencia instalada que aportó este material en cada año (por eso se multiplica por el % de tipo de célula para saber qué porcentaje se lleva en proporción y después por el % de material). A partir del año 2015 lo que se desea en este modelo base es seguir con la misma tendencia de los últimos años (ver variable “Incremento de Instalación”), por lo que se hace RAMP utilizando esa relación anterior.

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje Incremento de Instalación

Valor: 0.04

(Ver Anexo 15.3. Cálculo del Incremento de Instalación para el modelo base)

Tipo de Variable: Auxiliar

Porcentaje Instalado de CIGS

Valor: 0.03

Porcentaje de GW por tecnología (células de CIGS).

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver gráfico de sectores del Anexo 15.4)

Porcentaje de Cu Instalado

Valor: 0.9996

% de cantidad de Cu que contiene un panel solar en la célula CIGS.

Potencia Acumulada FV de Cu

Valor: Potencia Instalada FV de Cu

Valor inicio: 0.47513

Unidades: GW

Valor Inicial año 2008 $\rightarrow 15.844 \times 0,03 \times 0.9996 = 0.47513$ GW

0'9996 es el % de cantidad de Cu que contiene un panel solar en la célula CIGS

Tipo de Variable: Stock

Energía Producida Cu

Valor: $(\text{Potencia Acumulada FV de Cu} \times 24 \times 365) / (5.5 \times 1000)$

Unidades: TWh

Lo que se pretende con esta variable es, mediante la potencia acumulada de cada año, obtener la máxima energía que podrían suministrar (generar) las células en TWh, en este caso en proporción al material estudiado en este momento. Se utiliza la proporción de las Islas Baleares 5.5 entre la Potencia Acumulada y la energía Generada.

Tipo de Variable: Auxiliar

Ton a Extraer Cu > Año 2015

Valor: $(1.37368e+006 \times \text{Energía Producida Cu}) / 8.55$

Unidades: Toneladas

Toneladas utilizadas en el año 2014 $\rightarrow 1.87e+007$ de extracción y producción $\times 0,07$ % FV + 64680 recicladas = 1373680 ton

8.55 TWh en el año 2014

Tipo de Variable: Auxiliar

Como se expuso en la variable de extracción, durante los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, la misma cogerá los datos de producción históricos, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han generado en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de energía que se necesiten para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de material, dicha cantidad es el dato de salida de esta variable y el objeto de estudio del proyecto.

7.7. MODELO DEL TELURO O TELURIO



Fuente Imagen [57]

El elemento químico llamado Telurio tiene el símbolo Te, número atómico 52 y peso atómico 127.60. Se encuentra como elemento libre en la Tierra con una cantidad de 0,005 ppm, es el más escaso de todos los que vamos a estudiar en este proyecto con lo que probablemente este material sea limitante de las células de TeCd.

Utilidades [35]:

- Aditivo del acero → incrementar su ductilidad
- Como abrillantador → en electroplateados
- Como aditivo en catalizadores → para la desintegración catalítica del petróleo
- Como material colorante de vidrios y como aditivo del plomo → para incrementar su fuerza y resistencia a la corrosión.
- Células FV de TeCd.

Respecto a su producción y uso doméstico: En 2014, el Telurio se utilizó sobre todo en la producción de células solares a base de cadmio-telurio, que fue el uso final importante para el teluro en los Estados Unidos.

Las estimaciones del consumo mundial para el uso de teluro son los siguientes: 40% solar, un 30% la producción de termo eléctrico, 15% metalurgia, aplicaciones de caucho 5%, y 10% de otros [36].

Reciclaje: Una planta en los Estados Unidos recicla teluro a partir de células solares a base de cadmio-telurio; Sin embargo, la mayoría de esto era chatarra nueva porque las células solares de TeCd son relativamente nuevas y las primeras no han llegado al final de su vida útil.

Como se expuso en el modelo del Silicio, actualmente sólo hay dos métodos de reciclaje para los paneles que han sido testados y puestos en práctica [42], uno de ellos era de este material:

- Tratamiento del Silicio cristalino de Deutsche Solar (Alemania)
- Tratamiento de Teluro de Cadmio de First Solar (EUA, Alemania y Malasia)

De acuerdo con la BNL, la recuperación de teluro es 80% o mejor y se puede vender como de grado comercial al 99,7 % Te [50]. El reciclaje del teluro es aún reciente pero está creciendo a un ritmo constante (<10% de la oferta era recuperación de la chatarra en el año 2010) [51].

Es importante decir que el Cd es un material altamente tóxico, cercano al del mercurio (aunque la cantidad de Cd que puede tener un módulo es de 0,1% en peso lo que supone entre 3 y 10 g/m²). Se encuentra encapsulado pero aun así puede ser un peligro para el medioambiente si no se recicla bien, por ello es importante que se recicle de manera ecológica, a continuación encontramos el proceso de reciclaje de un módulo de TeCd:



EJEMPLO DEL RECICLADO DE MODULO TeCd en FIRSTSOLAR. Fuente: Web Empresa First Solar. Fuente Imagen [58]

Las principales fuentes de importación (2010-13) en EEUU son: Canadá, China, Filipinas y Bélgica [36].

Sustitutos: Varios materiales pueden reemplazar al telurio en la mayoría de sus usos, pero por lo general con pérdidas en la producción eficiencia o las características del producto. Bismuto, calcio, plomo, fósforo, selenio, azufre y se puede utilizar en lugar de telurio en muchos aceros de fácil mecanización. El silicio amorfo y el indio seleniuro de cobre de galio (CIGS) fueron los dos competidores principales de CdTe en las células fotovoltaicas de película delgada.

Variables y datos propuestos para el modelo:

Reservas Conocidas Te Anuales

Valor: IF THEN ELSE((Reservas Conocidas Te Anuales-Reservas Extraídas Te)<=0,0,-Reservas Extraídas Te)

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 27430

Tipo de Variable: Stock

Reservas de Telurio, *fuentes USGS año 2015:*

	Refinery production		Reserves ³
	2013	2014 ⁶	
United States	W	W	3,500
Canada	12	10	800
Japan	48	45	—
Peru	—	—	3,600
Russia	35	40	NA
Other countries ⁴	NA	NA	16,000
World total (rounded)	NA	NA	24,000

Reservas telurio = 21000 ton, referencia USGS del año 2008.

Reservas telurio = 22000 ton, referencia USGS del año 2010.

Reservas telurio = 24000 ton, referencia USGS del año 2012.

Como se han ido descubriendo cada año más reservas, se utiliza el dato del año 2014 más lo que se produjo los últimos años:

Reservas telurio = 24000 ton (referencia USGS del año 2014) + últimos años 3430 = 27430 toneladas en el año 2008

En la fórmula se puede ver que si las reservas decaen hasta un número menor a 0, se limita a esa cifra para que no den reservas negativas en las gráficas.

Reservas Extraídas Te

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Ton Necesarias Te al año*Porcentaje de Te destinado a Semiconductores),("Ton a Extraer Te > Año 2015"-Cantidad Te Reciclado))

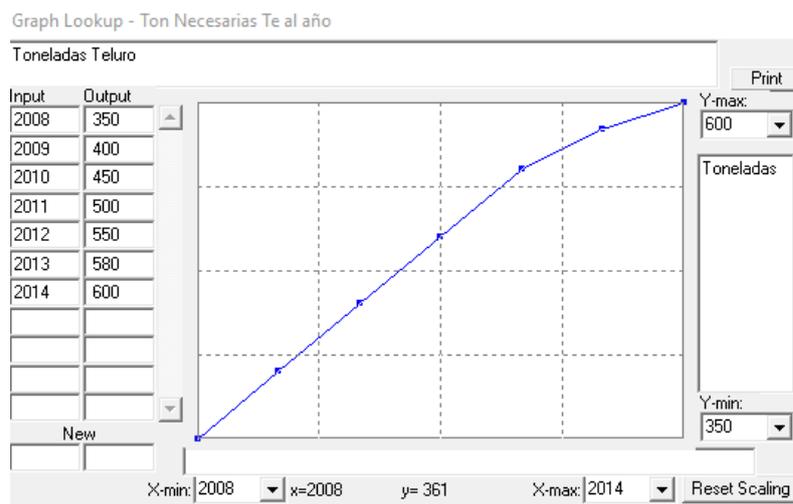
Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Flujo

Para los años anteriores que están comprendidos entre el año 2008 y 2014 coge los datos históricos de extracción-producción (puesto que son los totales de todas las industrias, se multiplica por su porcentaje de FV, lo que se utiliza dicho material para la industria solar fotovoltaica) y en años sucesivos, a partir del 2015 cogerá los datos en toneladas de material que se necesitarán para conseguir los TW instalados del escenario deseado, restándole la cantidad reciclada ese año, para obtener sólo la extracción necesaria.

Toneladas necesarias de Te al Año

Valores gráfica: ((2008,0)-
(2014,700)],(2008,350),(2009,400),(2010,450),(2011,500),(2012,550),(2013,580),(2014,600))



Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos relativos al gráfico son la producción Mundial Total de Teluro en los últimos años.

Fuente [36]: “EE.UU. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Enero el año 2015”

Porcentaje de Te destinado a semiconductores

Valor: 40/100

Unidad: Porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Producción de Te Acumulada

Valor: Reservas Extraídas Te

Valor Inicial: 140

Unidades: Toneladas

350 (ton producción total industria) x 0.4 (% FV) = 140 Ton el primer año.

Tipo de Variable: Stock

Producción de Te Anual 0

Valor: Cantidad Te Reciclado + Reservas Extraídas Te

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Ciclo de Vida Te

Este tipo de paneles solares TeCd tiene una vida útil de 25 años. Con lo que para el Teluro se pondrá esa cantidad.

Tipo de Variable: Auxiliar

Cantidad Te Reciclado

Valor: DELAY FIXED(Producción Te Anual 0*Porcentaje de Te Reciclado, Ciclo de Vida Te,7)

Unidades: toneladas

Como los paneles tienen una duración de 25 años, hasta esta fecha no se reciclarán, con lo que a las toneladas producidas cada año se las pone un delay (retraso) para que llegada esa fecha se reciclen y siga el ciclo de producción.

Para los años anteriores a 2038, la cantidad de reciclaje que proviene de los mismos es insignificante (según USGS) por lo que para tener un modelo más cercano a la realidad puesto que algo aunque sea una cantidad pequeña se ha reciclado, se pone un 10 % de lo reciclado en el año 2008 -> producción inicial $140 \times 0,50 \times 0.10 = 7$ ton

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje de Te Reciclado

Valor: 50/100 (Ver Anexo 15.5. Reciclaje de los materiales)

Unidad: porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Tn Te Reciclado

Valor: Cantidad Te Reciclado

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 70

La producción por la tasa de reciclaje: $140 \times 0,50 = 70$ toneladas el primer año 2008.

Tipo de Variable: Stock

Costes Energía Reciclaje Te

Valor: "Euros/ton reciclada Cu"*Cantidad Cu Reciclado

Unidades: euros

Tipo de Variable: Auxiliar

Euros Ton Reciclaje Te

Valor: 12.105 (Ver Anexo 15.2. Costes de reciclaje)

Unidad: euros/ton

Tipo de Variable: Auxiliar

Costes Energéticos Totales Telurio

Valor: Costes energía extracción y producción Te + Costes Energía Reciclaje Te

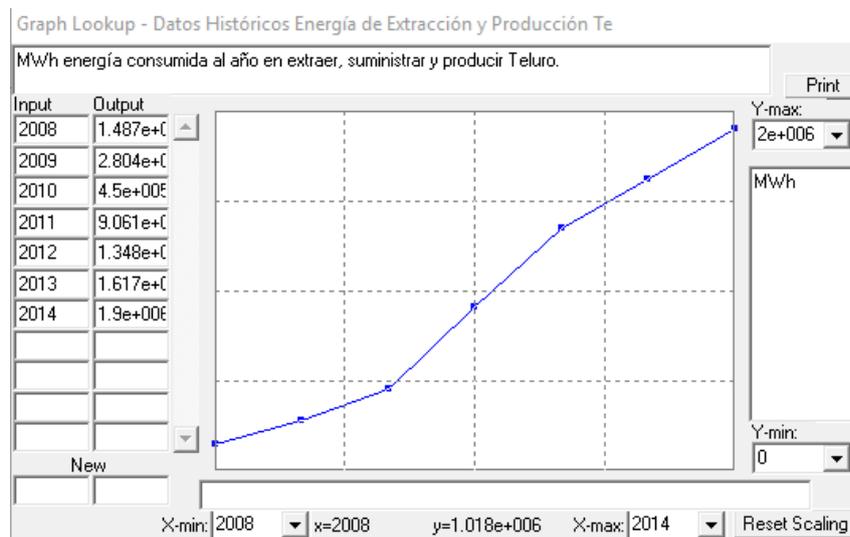
Unidad: euros

Suma aproximada de los costes totales que le cuesta la producción (reciclaje incluido) a la industria solar fotovoltaica.

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos Históricos Energía de Extracción y Producción Te

Valores gráfico: ((2008,0)-(2014,2e+006]),(2008,148651),(2009,280372),(2010,450023),(2011,906070),(2012,1.34781e+006),(2013,1.61705e+006),(2014,1.9e+006))



Unidad: MWh

MWh energía consumida al año en extraer, suministrar y producir Teluro.

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver Anexo 15.4. Gastos energéticos de los materiales)

Costes energía extracción y producción Te

Valor: IF THEN ELSE(Time<2015,Datos Históricos Energía de Extracción y Producción Te*Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0,(Reservas Extraídas Te*1.9e+006*Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0/240))

Unidad: euros

En el año 2014 se extrajeron $600 \times 0.4 = 240$ toneladas con una energía de $1.9e+006$ MWh

Tipo de Variable: Auxiliar

Para los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, cogerá los datos de gasto históricos y los multiplicará por su precio, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han consumido para extraerse y producirse en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de material que se obtengan para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de energía para extraer y producir dichas cantidades, posteriormente se multiplica por su precio para tener los costes.

Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0

Valor: 40

Unidad: euros/MWh

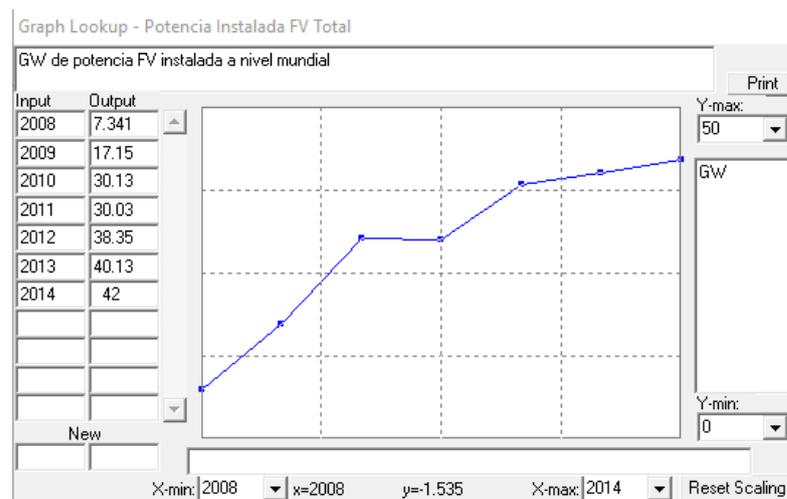
Respecto a la productividad, la energía fotovoltaica es de las más caras del mundo. Cada MWh producido ha costado 150/450€ (en comparación con 35-175€/MWh de la eólica y 40-50€/MWh de las centrales eléctrica y nucleares.[77]

Puesto que la industria FV a la hora de producir no va a utilizar su propia energía generada, se cogerá como dato el más barato de todas las energías, 40 euros de las centrales eléctricas.

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV Total

Valores gráfico: ((2008,0)-
(2014,50)],(2008,7.341),(2009,17.15),(2010,30.13),(2011,30.03),(2012,38.35),(
2013,40.13),(2014,42))



Unidades: GW

GW de potencia FV instalada a nivel mundial (entre todas las células FV)

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV de Te

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de TeCd*Porcentaje de Te Instalado),RAMP(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de TeCd*Porcentaje de Te Instalado*Porcentaje Incremento de Instalación,2015,2050)+0.076)

Unidades: GW

42 GW último dato x 0.04 TeCd x 0.045 Te = 0.076

Lo que se pretende en esta variable es, mediante los datos de potencia instalada mundial de todos los tipos de células, desagregar ese dato para obtener la potencia instalada que aportó este material en cada año (por eso se multiplica por el % de tipo de célula para saber qué porcentaje se lleva en proporción y después por el % de material). A partir del año 2015 lo que se desea en este modelo base es seguir con la misma tendencia de los últimos años (ver variable "Incremento de Instalación"), por lo que se hace RAMP utilizando esa relación anterior.

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje Incremento de Instalación

Valor: 0.04

(Ver Anexo 15.3. Cálculo del Incremento de Instalación para el modelo base)

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Acumulada FV de Te

Valor: Potencia Instalada FV de Te

Valor inicio: 0.029

Unidades: GW

Valor Inicial año 2008 → 15.844 GW x 0,04 x 0,045 = 0.029 GW

Tipo de Variable: Stock

Porcentaje Instalado de TeCd

Valor: 0.04

Porcentaje de GW por tecnología (células de TeCd).

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver gráfico de sectores del Anexo 15.4)

Porcentaje de Te Instalado

Valor: 0.045

% de cantidad de Te que contiene un panel solar en la célula TeCd.

Energía Producida Te

Valor: $(\text{Potencia Acumulada FV de Te} * 24 * 365) / (5.5 * 1000)$

Unidades: TWh

Lo que se pretende con esta variable es, mediante la potencia acumulada de cada año, obtener la máxima energía que podrían suministrar (generar) las células en TWh, en este caso en proporción al material estudiado en este momento. Se utiliza la proporción de las Islas Baleares 5.5 entre la Potencia Acumulada y la energía Generada.

Tipo de Variable: Auxiliar

Ton a Extraer Te > Año 2015

Valor: $(240.7 * \text{Energía Producida Te}) / 0.5139$

Unidades: Toneladas

Toneladas utilizadas en el año 2014 → 600 de extracción y producción x 0,40 % FV + 0,7 recicladas = 240.7 ton

0.5139 TWh en el año 2014

Tipo de Variable: Auxiliar

Como se expuso en la variable de extracción, durante los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, la misma cogerá los datos de producción históricos, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han generado en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de energía que se necesiten para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de material, dicha cantidad es el dato de salida de esta variable y el objeto de estudio del proyecto.

7.8. MODELO DEL CADMIO



Fuente Imagen [59]

Este elemento químico es relativamente raro (0,11 ppm en la Tierra), su símbolo es Cd, número atómico 48 y tiene relación estrecha con el zinc, es más blando y maleable que él, pero un poco más duro que el estaño. Es un metal dúctil, de color blanco con un ligero matiz azulado.

Utilidades [35]:

- Cubierta electro-depositada sobre hierro o acero → para protegerlos contra la corrosión.
- Baterías de níquel-cadmio
- Reactivo químico y pigmento
- Compuestos de cadmio → como estabilizadores de plásticos y en la producción de cadmio fosforado.
- En barras de control y recubrimiento de reactores nucleares → Por su gran capacidad de absorber neutrones, en especial el isótopo 113.
- Paneles solares FV de TeCd.

Respecto a su producción y uso doméstico, hay tres compañías de Estados Unidos que produjeron cadmio refinado en 2014 (las de en Tennessee, Ohio y Pensilvania).

Pero la mayoría de cadmio metálico primario del mundo se produjo en Asia. Los principales productores (líderes mundiales) fueron China, la República de Corea y Japón [36]. Por ello, el cadmio se consume principalmente en China, Bélgica y Japón. La producción de baterías de NiCd representó el 80% del consumo mundial de cadmio, y el resto, en orden descendente de consumo, en los pigmentos, revestimientos y chapado, estabilizadores para plásticos, aleaciones no ferrosas [36], y otros usos especializados (incluyendo fotovoltaica dispositivos). Con lo que

del 20 % restante donde entra en juego la fotovoltaica, se coge para ésta un 15 % dedicado a semiconductores FV.

Sobre el reciclaje, decir que el cadmio se recupera principalmente de los consumidores de baterías de NiCd gastadas e industriales pero como tasa de reciclaje de este material se tiene un 80 % [48]. Aun así, es probable que la disponibilidad de telurio limite el futuro de la producción de células solares de CdTe en vez de el cadmio, por lo que el reciclaje de este material no es relevante, lo es más el del telurio.

Las fuentes de importación (2010-13) en EEUU fueron: Canadá, Australia, Bélgica, Luxemburgo, México y China [36].

Variables y datos propuestos para el modelo:

Reservas Conocidas Cd Anuales

Valor: IF THEN ELSE((Reservas Conocidas Cd Anuales-Reservas Extraídas Cd)<=0,0,-Reservas Extraídas Cd)

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 7.0459e+006

Tipo de Variable: Stock

No se encontraron reservas de Cadmio, pero como generalmente se recupera de minerales de zinc y sus concentrados. El contenido en cadmio de minerales típicos de zinc promedios aproximadamente 0,03%.

	Mine production'		Reserves°
	2013	2014°	
United States	784	820	10,000
Australia	1,520	1,500	°62,000
Bolivia	407	410	4,500
Canada	426	350	5,900
China	5,000	5,000	43,000
India	793	700	11,000
Ireland	327	300	1,100
Kazakhstan	362	330	10,000
Mexico	643	700	16,000
Peru	1,350	1,300	29,000
Other countries	1,800	1,900	42,000
World total (rounded)	13,400	13,300	230,000

World Resources: Identified zinc resources of the world are about 1.9 billion metric tons.

Reservas de Zinc. Datos en mil ton. Fuente: USGS

Reservas Cadmio $\rightarrow 230.000.000 \text{ ton} \times 0,03 = 6900000 \text{ ton}$ año 2015 + lo extraído en los últimos años 145900 = 7045900 toneladas de Cadmio en el año 2008

En la fórmula se puede ver que si las reservas decaen hasta un número menor a 0, se limita a esa cifra para que no den reservas negativas en las gráficas.

Reservas Extraídas Cd

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Toneladas necesarias de Cd al año*"% de Cd destinado a semiconductores"),("Ton a Extraer Cd > Año 2015"-Cantidad Cd Reciclado))

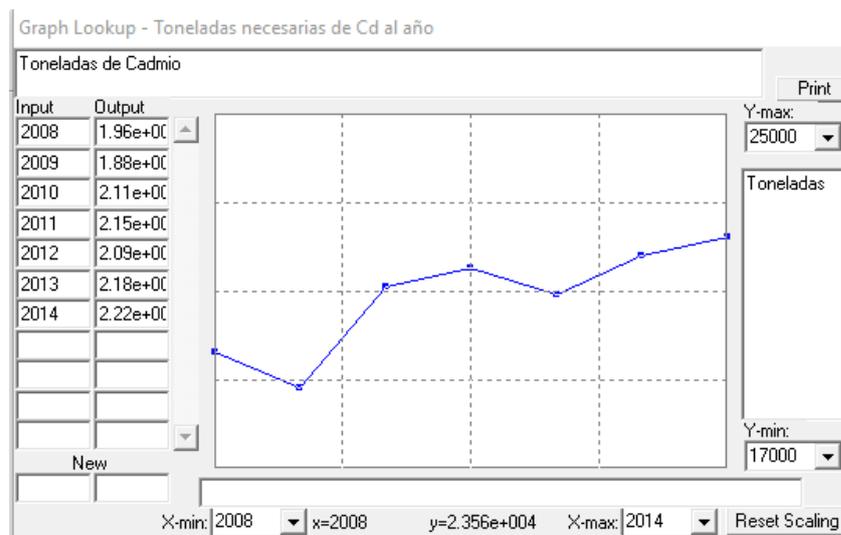
Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Flujo

Para los años anteriores que están comprendidos entre el año 2008 y 2014 coge los datos históricos de extracción-producción (puesto que son los totales de todas las industrias, se multiplica por su porcentaje de FV, lo que se utiliza dicho material para la industria solar fotovoltaica) y en años sucesivos, a partir del 2015 cogerá los datos en toneladas de material que se necesitarán para conseguir los TW instalados del escenario deseado, restándole la cantidad reciclada ese año, para obtener sólo la extracción necesaria.

Toneladas necesarias de Cd al Año

Valores gráfica: ((2008,17000)-(2014,25000)],(2008,19600),(2009,18800),(2010,21100),(2011,21500),(2012,20900),(2013,21800),(2014,22200))



Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos relativos al gráfico son la producción Mundial Total de Cadmio en los últimos años.

Fuente [36]: “EE.UU. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Enero el año 2015”

Porcentaje de Cd destinado a semiconductores

Valor: 15/100

Unidad: Porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Producción de Cd Acumulada

Valor: Reservas Extraídas Cd

Valor Inicial: 2940

Unidades: Toneladas

19600 (ton producción total industria) $\times 0.15$ (% FV) = 2940 Ton el primer año 2008.

Tipo de Variable: Stock

Producción de Cd Anual 0

Valor: Cantidad Cd Reciclado + Reservas Extraídas Cd

Unidades: toneladas

Tipo de Variable: Auxiliar

Ciclo de Vida Cd

Este tipo de paneles solares TeCd tiene una vida útil de 25 años. Con lo que para el Cadmio se pondrá esa cantidad.

Tipo de Variable: Auxiliar

Cantidad Cd Reciclado

Valor: DELAY FIXED(Producción Cd Anual 0*Porcentaje de Cd Reciclado, Ciclo de Vida Cd,235.2)

Unidades: toneladas

Como los paneles tienen una duración de 25 años, hasta esta fecha no se reciclarán, con lo que a las toneladas producidas cada año se las pone un delay (retraso) para que llegada esa fecha se reciclen y siga el ciclo de producción.

Para los años anteriores a 2038, la cantidad de reciclaje que proviene de los mismos es insignificante (según USGS) por lo que para tener un modelo más cercano a la realidad puesto que algo aunque sea una cantidad pequeña se ha reciclado, se pone un 10 % de lo reciclado en el año 2008 -> producción inicial (2940 ton) x 0,80 reciclado x 0.10 = 235.2 ton

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje de Cd Reciclado

Valor: 80/100 (Ver Anexo 15.5. Reciclaje de los materiales)

Unidad: porcentaje

Tipo de Variable: Auxiliar

Tn Cd Reciclado

Valor: Cantidad Cd Reciclado

Unidades: toneladas

Valor Inicial: 2352

Valor inicial toneladas recicladas en el año 2008 = producción inicial (2940 ton) x 0,80 reciclado = 2352 ton

Tipo de Variable: Auxiliar

Costes Energía Reciclaje Cd

Valor: "Euros/ton reciclada Cd"*Cantidad Cd Reciclado

Unidades: euros

Tipo de Variable: Auxiliar

Euros Ton Reciclaje Cd

Valor: 256.895 (Ver Anexo 15.2. Costes de reciclaje)

Unidad: euros/ton

Tipo de Variable: Auxiliar

Costes Energéticos Totales Cadmio

Valor: Costes energía extracción y producción Cd + Costes energía reciclaje Cd

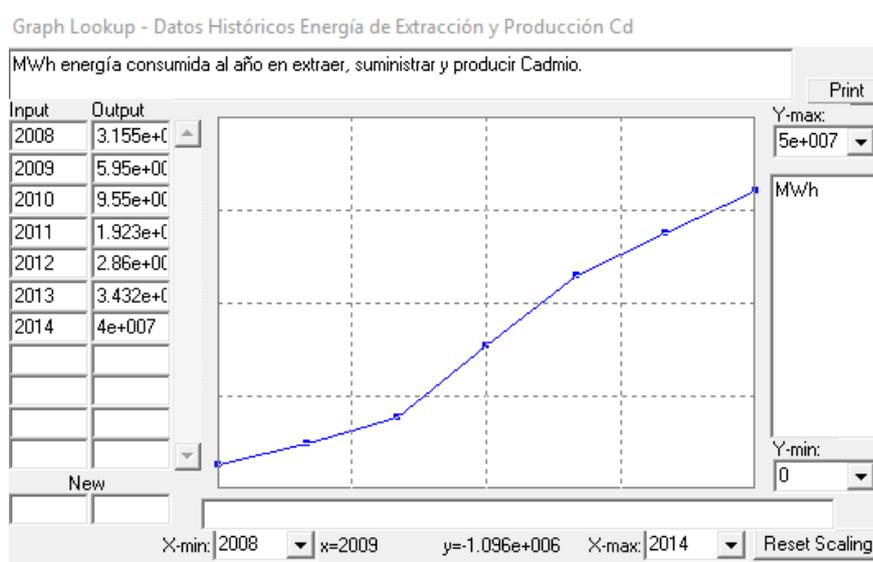
Unidad: euros

Suma aproximada de los costes totales que le cuesta la producción (reciclaje incluido) a la industria solar fotovoltaica.

Tipo de Variable: Auxiliar

Datos Históricos Energía de Extracción y Producción Cd

Valores gráfico: ((2008,0)-(2014,5e+007)),(2008,3.15471e+006),(2009,5.95012e+006),(2010,9.55049e+006),(2011,1.92288e+007),(2012,2.86036e+007),(2013,3.43173e+007),(2014,4e+007))



Unidad: MWh

MWh energía consumida al año en extraer, suministrar y producir Cadmio.

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver Anexo 15.4. Gastos energéticos de los materiales)

Costes energía extracción y producción Cd

Valor: IF THEN ELSE(Time<2015,Datos Históricos Energía de Extracción y Producción Cd*Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0,(Reservas Extraídas Cd*4e+007*Precio Medio Producción Energética de 1 MWh 0/3330))

Unidad: euros

En el año 2014 se extrajeron $22200 \times 0.15 = 3330$ toneladas con una energía de $4e+007$ MWh

Tipo de Variable: Auxiliar

Para los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, cogerá los datos de gasto históricos y los multiplicará por su precio, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han consumido para extraerse y producirse en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de material que se obtengan para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de energía para extraer y producir dichas cantidades, posteriormente se multiplica por su precio para tener los costes.

Precio Medio Producción Enegetica de 1 MWh 0

Valor: 40

Unidad: euros/MWh

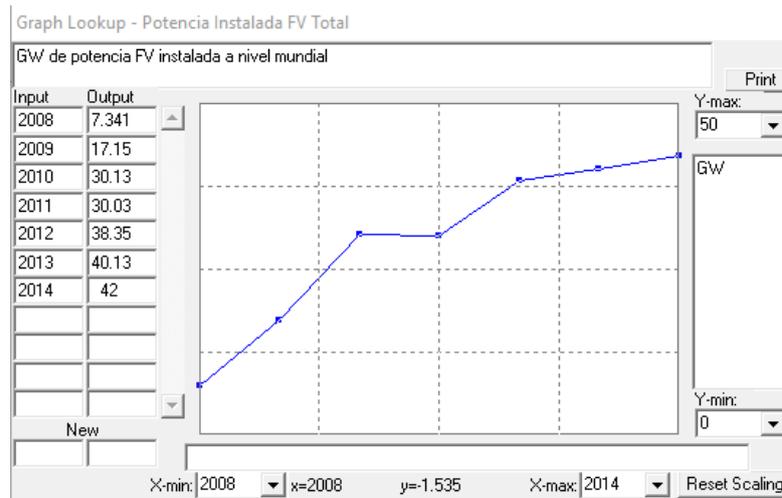
Respecto a la productividad, la energía fotovoltaica es de las más caras del mundo. Cada MWh producido ha costado 150/450€ (en comparación con 35-175€/MWh de la eólica y 40-50€/MWh de las centrales eléctrica y nucleares.[77]

Puesto que la industria FV a la hora de producir no va a utilizar su propia energía generada, se cogerá como dato el más barato de todas las energías, 40 euros de las centrales eléctricas.

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV Total

Valores gráfico: ((2008,0)-(2014,50]),(2008,7.341),(2009,17.15),(2010,30.13),(2011,30.03),(2012,38.35),(2013,40.13),(2014,42))



Unidades: GW

GW de potencia FV instalada a nivel mundial (entre todas las células FV)

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Instalada FV de Cd

Valor: IF THEN ELSE(Time<=2014,(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de TeCd*Porcentaje de Cd Instalado),RAMP(Potencia Instalada FV Total*Porcentaje Instalado de TeCd*Porcentaje de Cd Instalado*Porcentaje Incremento de Instalación,2015,2050)+1.6)

Unidades: GW

42 GW último año x 0.04 TeCd x 0.955 Cd = 1.6

Lo que se pretende en esta variable es, mediante los datos de potencia instalada mundial de todos los tipos de células, desagregar ese dato para obtener la potencia instalada que aportó este material en cada año (por eso se multiplica por el % de tipo de célula para saber qué porcentaje se lleva en proporción y después por el % de material). A partir del año 2015 lo que se desea en este modelo base es seguir con la misma tendencia de los últimos años (ver variable "Incremento de Instalación"), por lo que se hace RAMP utilizando esa relación anterior.

Tipo de Variable: Flujo

Porcentaje Incremento de Instalación

Valor: 0.04

(Ver Anexo 15.3. Cálculo del Incremento de Instalación para el modelo base)

Tipo de Variable: Auxiliar

Potencia Acumulada FV de Cd

Valor: Potencia Instalada FV de Cd

Valor inicio 0.605

Unidades: GW

Valor Inicial año 2008 $\rightarrow 15.844 \text{ GW} \times 0,04 \times 0,955 = 0.605 \text{ GW}$

Tipo de Variable: Stock

Porcentaje Instalado de TeCd

Valor: 0.04

Porcentaje de GW por tecnología (células de TeCd).

Tipo de Variable: Auxiliar

(Ver gráfico de sectores del Anexo 15.4)

Porcentaje de Cd Instalado

Valor: 0.955

% de cantidad de Cd que contiene un panel solar en la célula TeCd.

Energía Producida Cd

Valor: $(\text{Potencia Acumulada FV de Cd} \times 24 \times 365) / (5.5 \times 1000)$

Unidades: TWh

Lo que se pretende con esta variable es, mediante la potencia acumulada de cada año, obtener la máxima energía que podrían suministrar (generar) las células en TWh, en este caso en proporción al material estudiado en este momento. Se utiliza la proporción de las Islas Baleares 5.5 entre la Potencia Acumulada y la energía Generada.

Tipo de Variable: Auxiliar

Ton a Extraer Cd > Año 2015

Valor: $(3565.2 \times \text{Energía Producida Cd}) / 10.89$

Unidades: Toneladas

Toneladas utilizadas en el año 2014 --> 22200 de extracción y producción x 0,15 %
FV + 235.2 recicladas = 3565.2 ton

10.89 TWh en el año 2014

Tipo de Variable: Auxiliar

Como se expuso en la variable de extracción, durante los años comprendidos entre el año 2008 y 2014, la misma cogerá los datos de producción históricos, sin embargo para los años sucesivos, a partir del año 2015 se hace una proporción utilizando las cantidades de reservas extraídas-producidas con la energía que han generado en un año concreto, en este caso se eligió el del 2014 y a partir de esa proporción con los datos nuevos de energía que se necesiten para llegar a cada escenario, se necesitará una determinada cantidad de material, dicha cantidad es el dato de salida de esta variable y el objeto de estudio del proyecto.

7.9. CÉLULAS FV - RELACIÓN ENTRE MATERIALES

Las variables que relacionan cada material con el tipo de célula al que pertenecen son:

Energía Producida SI

$(\text{Potencia Acumulada FV de SI} * 24 * 365) / (5.5 * 1000)$

Unidades: TWh

Fue explicada con anterioridad, pero al englobar células (monocristalinas, policristalinas y amorfas) es sólo un tipo de material, células de Silicio por ello esta variable se utiliza en el dato de energía total final.

Tipo de Variable: Auxiliar

Energía FV Producida por Células GaAs

Energía Producida As + Energía Producida Ga del GaAs

Unidades: TWh

Tipo de Variable: Auxiliar

Energía FV Producida por Células CIGS

Valor: Energía Producida Cu + Energía Producida Ga del CIGS + Energía Producida In + Energía Producida Se

Unidades: TWh

Tipo de Variable: Auxiliar

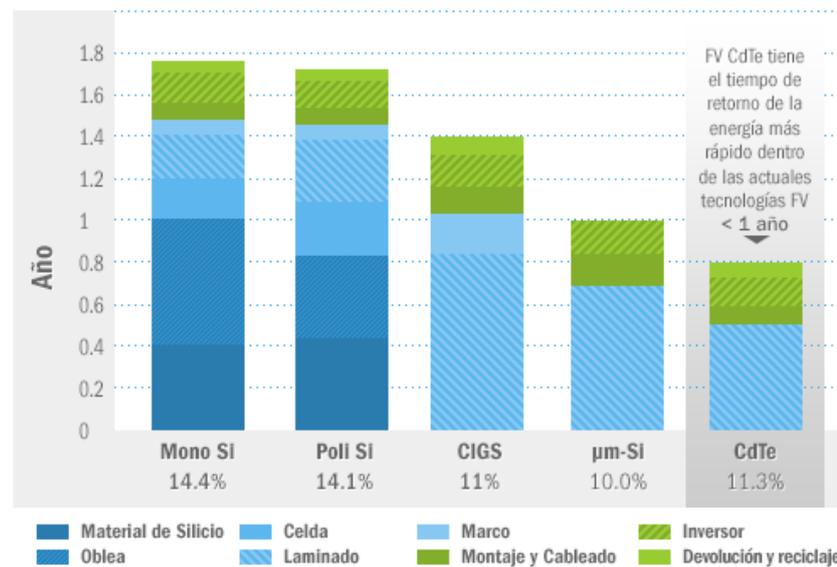
Energía FV Producida por Células TeCd

Valor: Energía Producida Cd + Energía Producida Te

Unidades: TWh

Tipo de Variable: Auxiliar

Como dato de interés se tiene que este tipo de células tiene el retorno energético más rápido de todas ellas, lo cual es algo bueno de cara al futuro pues esto hace que este tipo de células sean más competitivas respecto a otras, se puede ver en el siguiente gráfico:



Fuente Imagen [60]

Energía TOTAL Producida por células FV

Energía Producida SI + Energía FV Producida por Células GaAs + Energía FV Producida por Células CIGS + Energía FV Producida por Células TeCd

Unidades: TWh

Tipo de Variable: Auxiliar

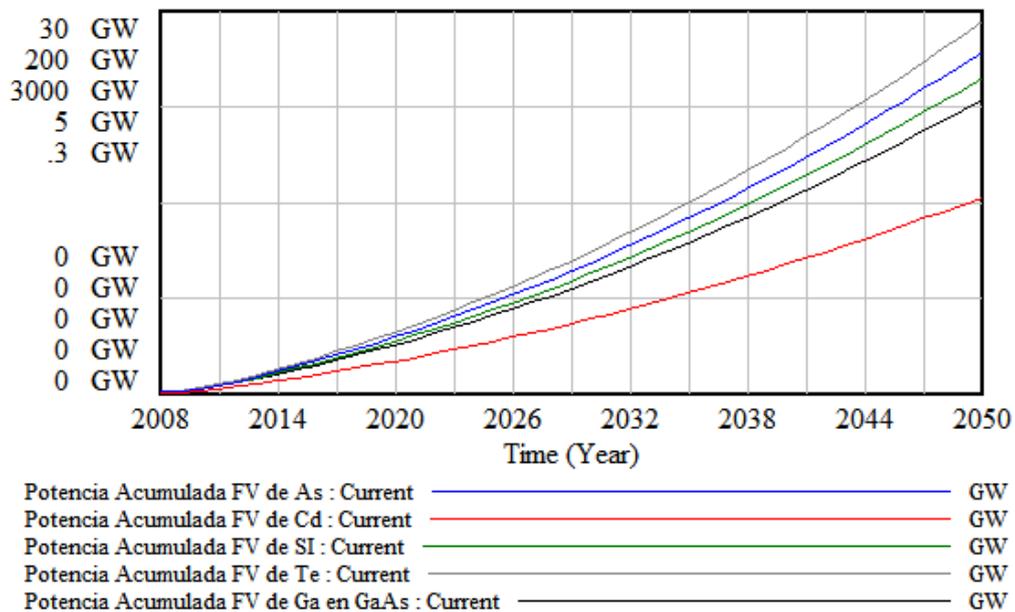


8. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN – MODELO BASE

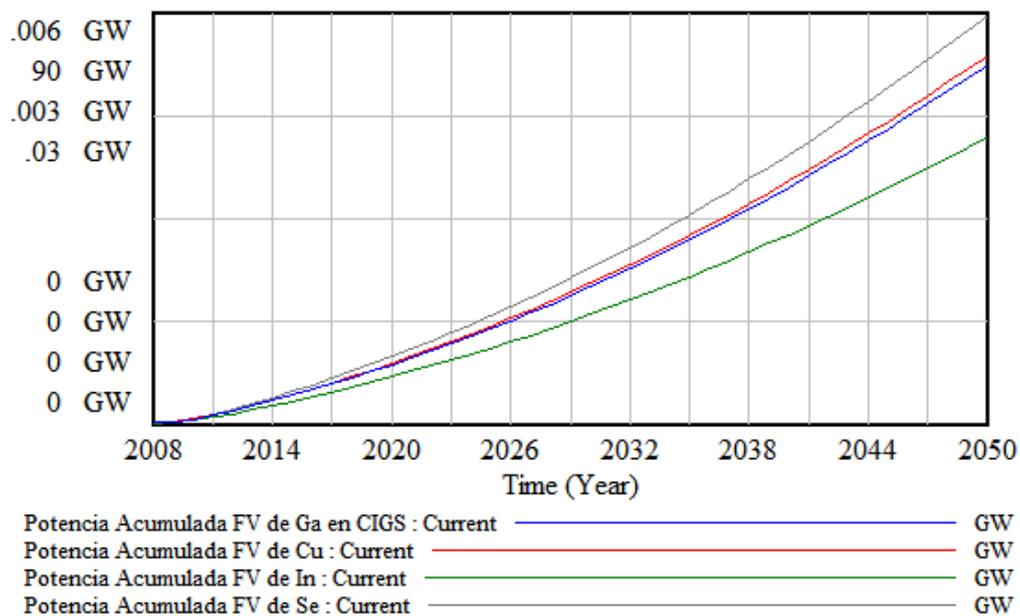
La simulación del modelo base da como resultado los siguientes gráficos:

Respecto a la cantidad de potencia instalada acumulada, que es uno de los objetivos del proyecto referido a conseguir, se puede ver que siguen la tendencia de los años históricos (2008-2014) los materiales:

Potencia Instalada Acumulada 1

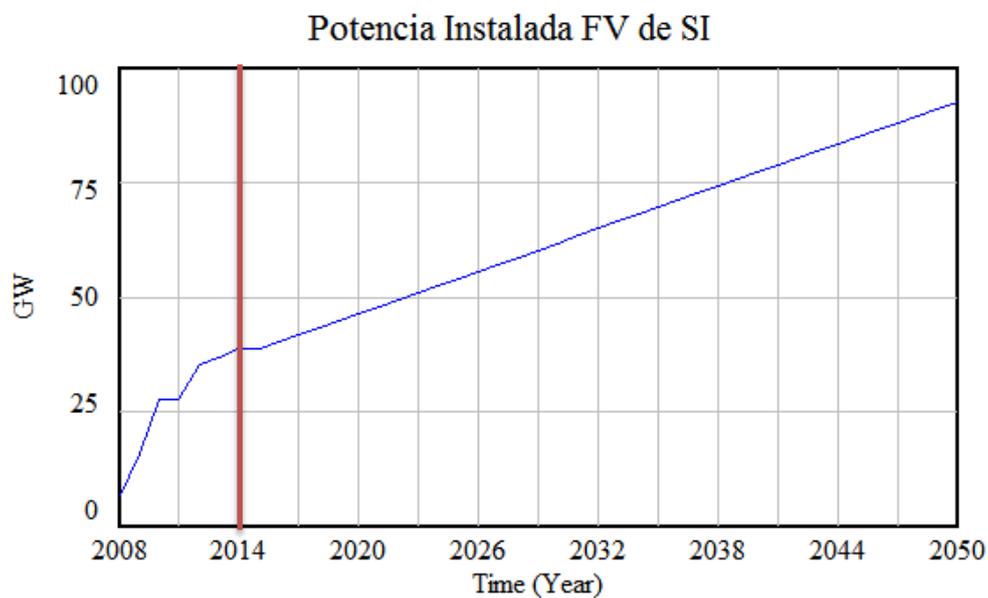


Potencia Instalada Acumulada 2



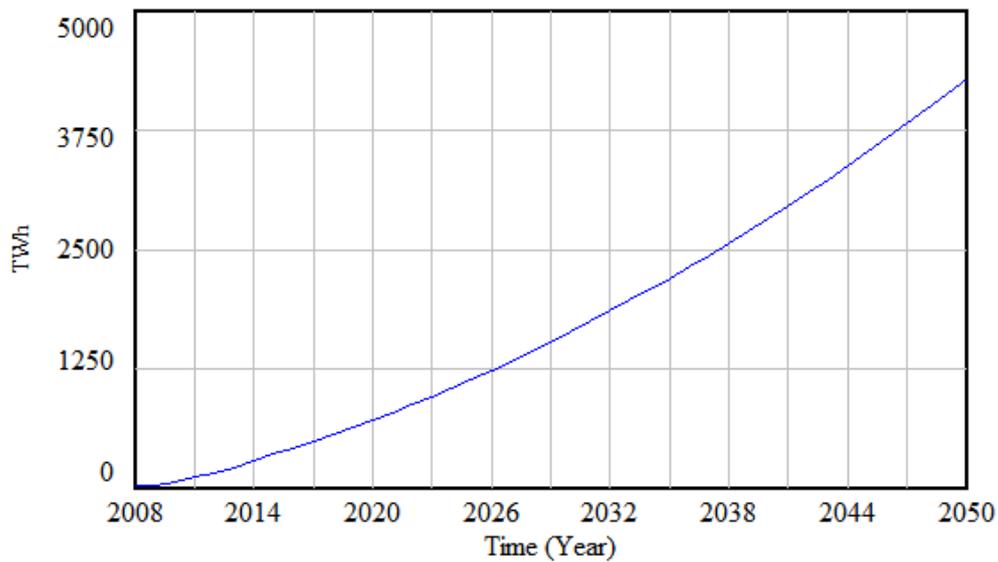
Hasta alcanzar entre todas la suma de instalaciones acumuladas aproximadamente el 10 % del mix energético mundial estimado en 2050 como 28 TW, con lo que se llega en este modelo medio a los 2,8 TW, correcto.

Por lo que puede decirse que la tendencia marcada (mismo aumento de instalación que en los últimos años) seguirá en todos los materiales la misma pendiente media que en el silicio, que además es el material que más influye en la energía producida pues al ser un 92 % de paneles de silicio son los que más energía en el mundo pueden dar.



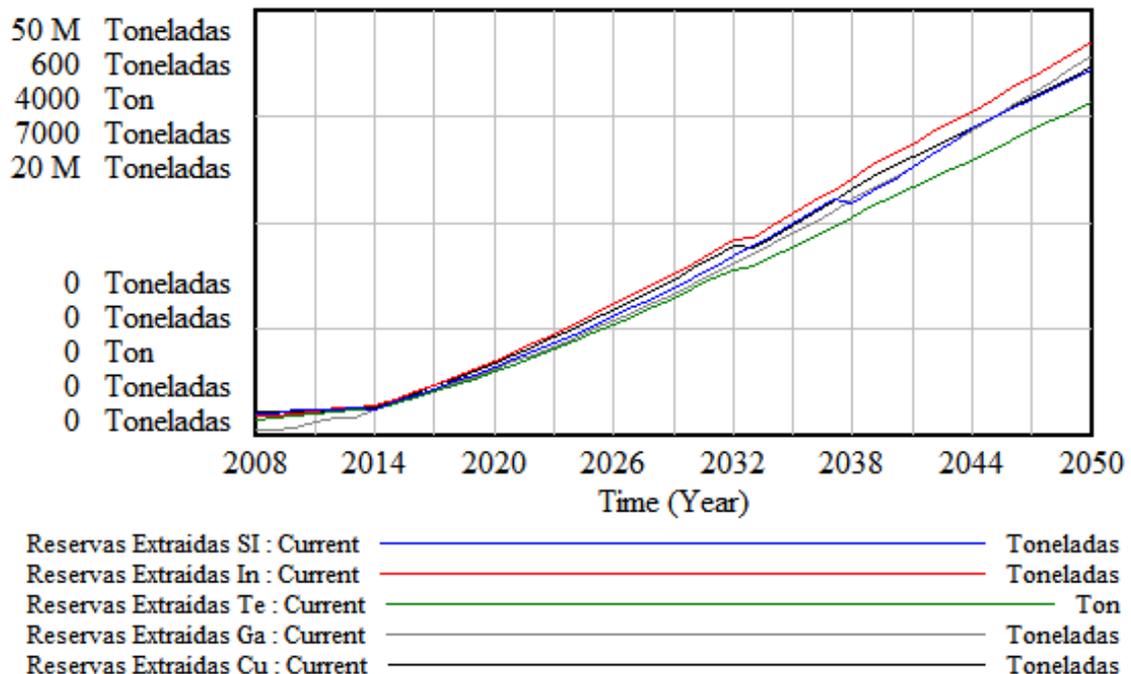
Ahora se va a ver qué ocurre en las demás variables al alcanzarse dichos valores de instalación.

Respecto a la energía producida total:



Se puede apreciar que llega a producirse una energía aproximada de 4000 TWh, correspondiente a un escenario medio (donde se cumple la proporción de 1/5.5 entre la potencia acumulada instalada y la energía producida).

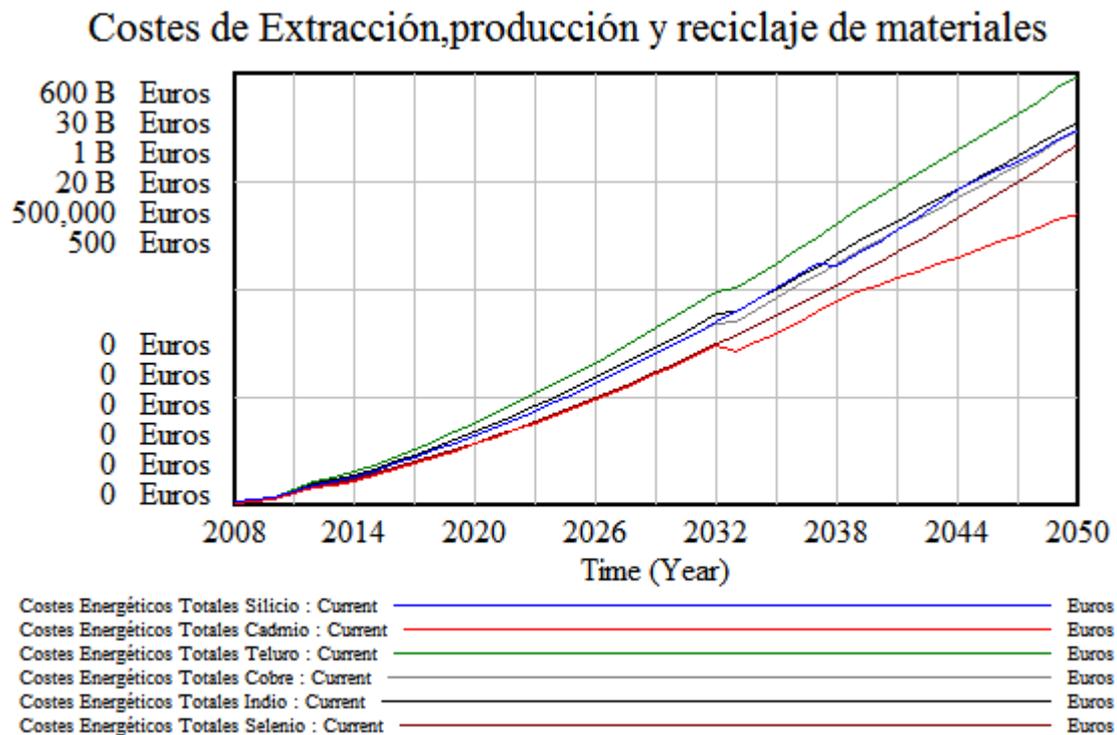
Viendo los datos de extracción de algunos de los materiales:



Se puede sacar como conclusión, que la tendencia o pendiente que debieran seguir los datos de extracción se ve moderada por unos pequeños escalones en los que

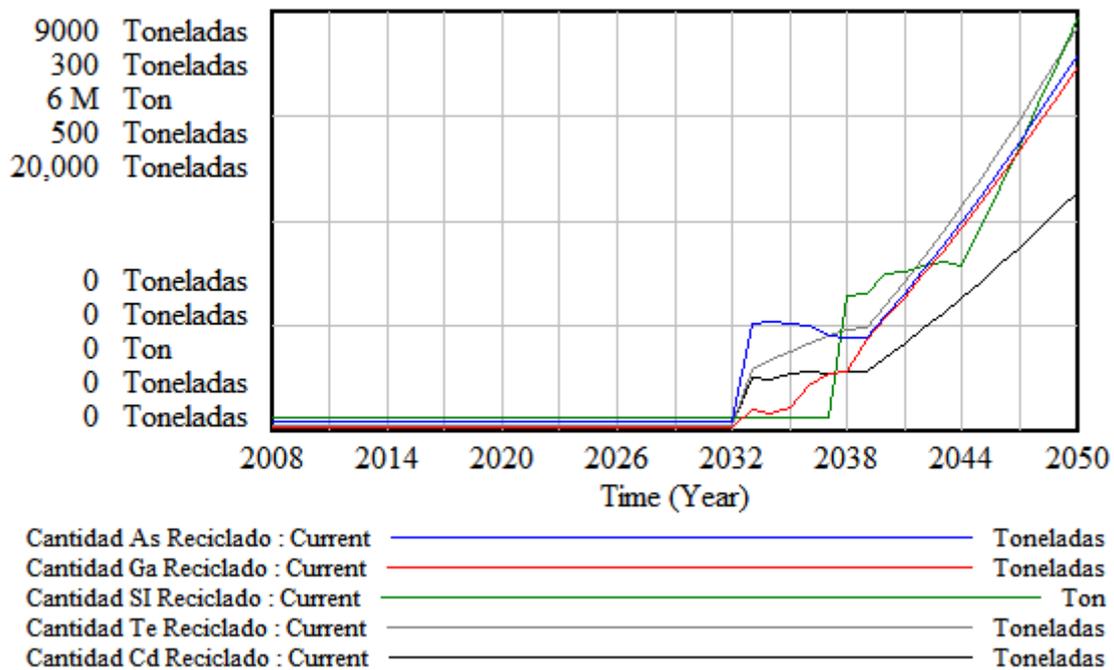
disminuye algo la pendiente, esto se debe a que a partir de esos años entra en juego el reciclaje y cuanto más se recicla, menos cantidades de material se deben extraer.

Con los costes ocurre lo mismo, llega un momento en que empieza a reciclarse más y los costes de extracción y producción disminuyen su tendencia al alza. En la siguiente gráfica tenemos los costes de algunos de los materiales que más influyen en la energía final generada:



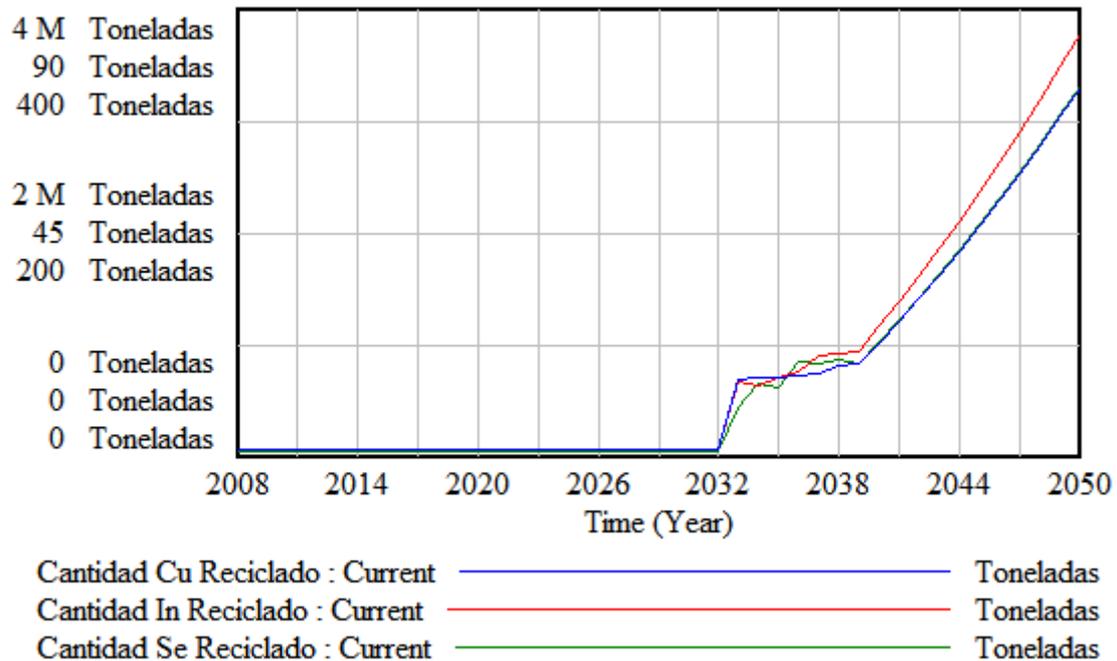
Respecto al reciclaje:

Cantidad de Material Reciclado 1



En este primer bloque de materiales se puede ver que el silicio del año inicial 2008 empieza a reciclarse más tarde que los demás materiales, estos paneles tienen 30 años de vida útil en vez de 25 años, aún así es de los que más se recicla, cuando empieza lo hace con valores mucho más grandes que los otros. Se puede ver como todos aumentan con los años, en mayor o menor pendiente mientras que el arsénico los primeros años de reciclaje disminuye, esto es correcto puesto que la producción de los años históricos hasta 2014 fue disminuyendo, sin embargo para que siga la tendencia de potencia instalada anual, posteriormente debe volver a aumentar como lo hace.

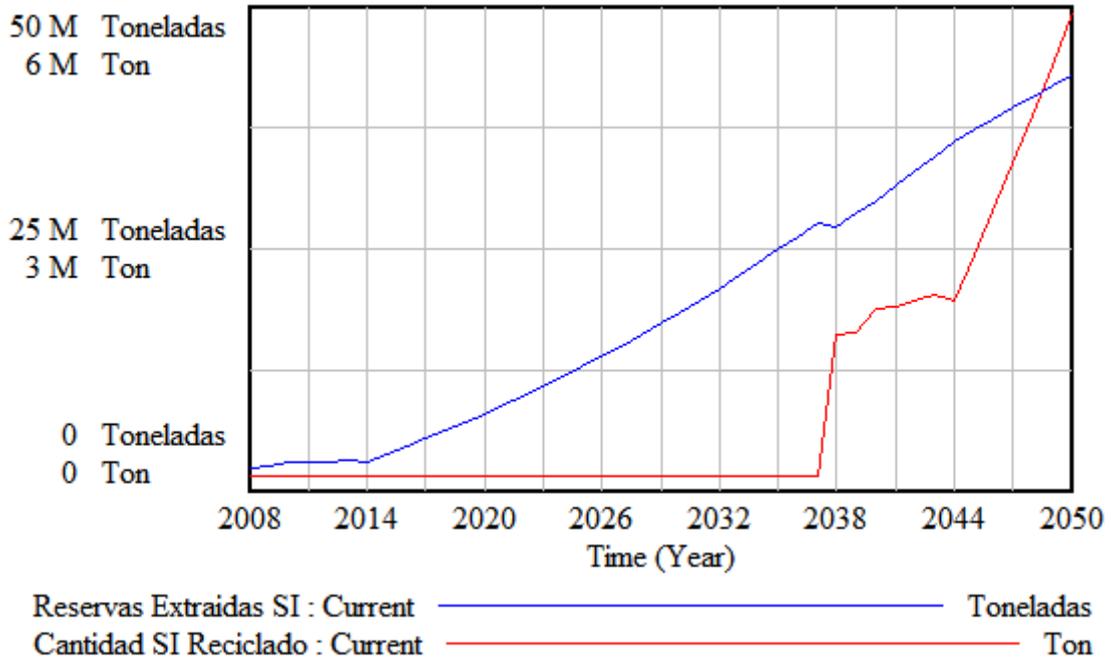
Cantidad de Material Reciclado 2



En este segundo bloque de materiales no hay nada anómalo, los tres empiezan a aumentar el reciclaje a partir de los 25 años desde el año 2008 y lo hacen de forma casi exponencial, como debería de ser en todos pues cuanto más aumente el reciclaje, menos material se extraerá de la mina y así las reservas no se acabarían, por lo que se podrían fabricar paneles durante muchos años más.

Aún así, se puede observar en el gráfico del silicio (como ejemplo), que hasta llegar a reciclar tanto como para no tener que extraer nada de la mina faltaría mucho, además tampoco sería bueno llegar a ese punto pues de tanto reciclar se perdería calidad de los módulos solares FV y tendrían menor eficiencia:

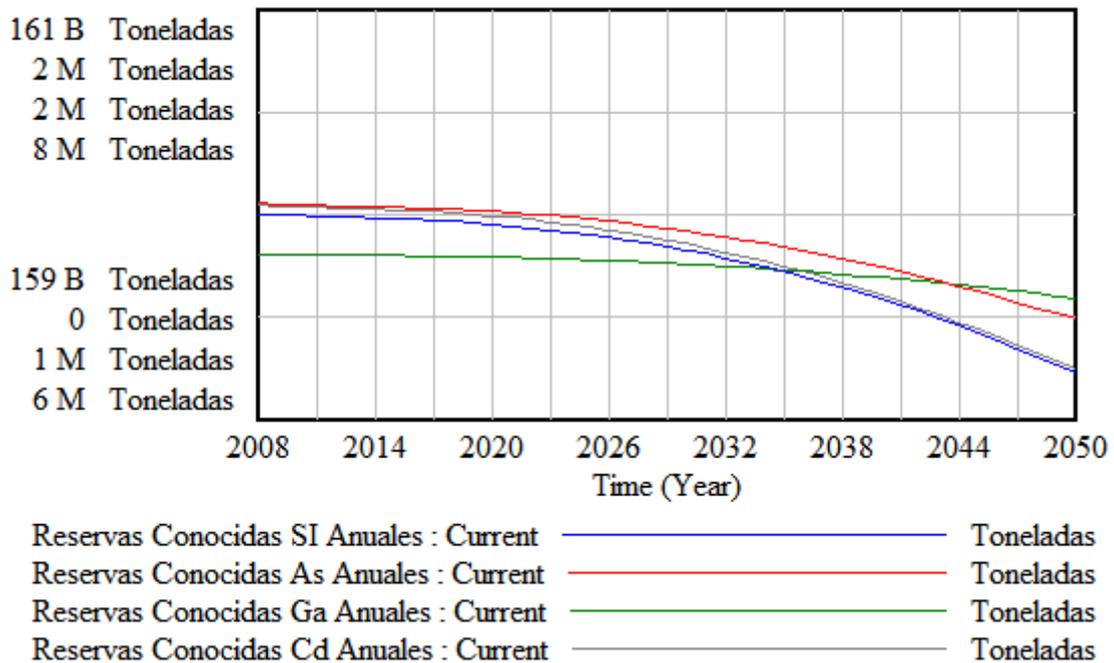
Extracción VS Reciclado



(Falta cantidad de reciclado hasta cubrir la necesidad de extracción de material, en este caso el del silicio)

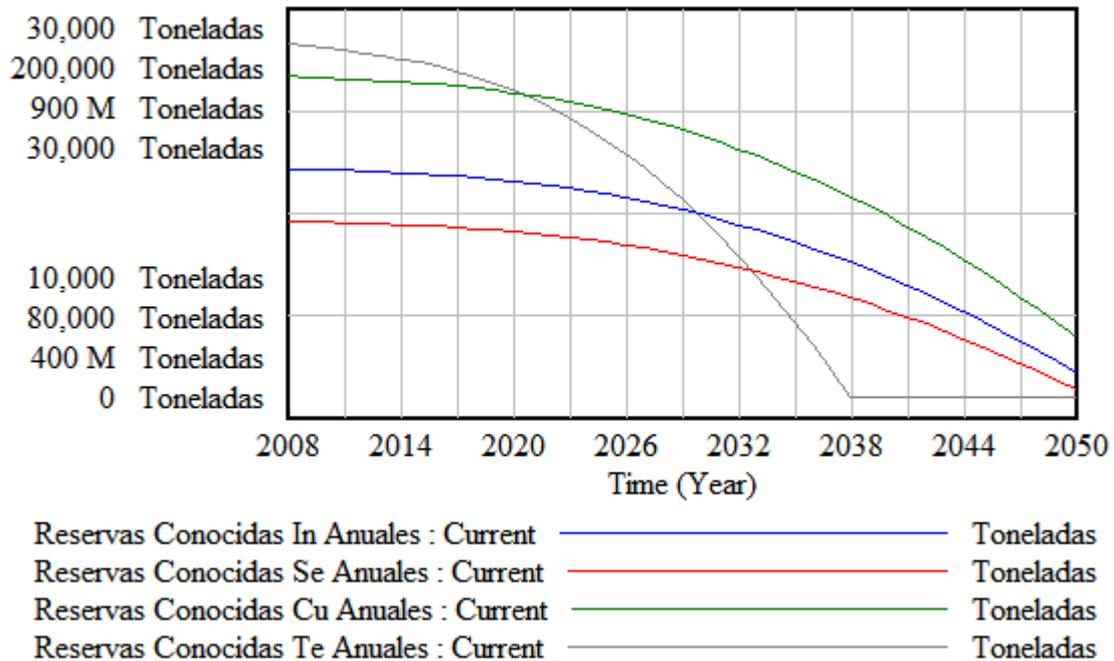
Sobre las reservas de los materiales, objeto de estudio de este proyecto, se tienen:

Reservas de los Materiales 1



Se puede ver que con esos niveles de instalación, la cantidad de material que queda en las reservas para los materiales del silicio, arsénico, galio y cadmio no se acaban en el año 2050.

Reservas de los Materiales 2

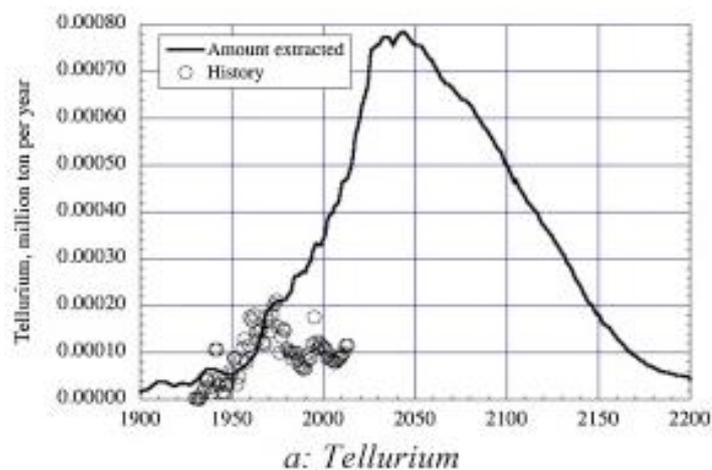


Tampoco se agotan el indio, selenio y cobre pues en las células de capa delgada se usa poco material respecto a los de silicio, con lo que habrá más material disponible en un futuro. Sin embargo el telurio si se acaba en el año en el que empieza a obtenerse reciclaje de los paneles de TeCd del año 2008, es el material que menos reservas posee con lo que se debería de empezar a reciclar antes pero estas células son muy jóvenes todavía, no hay muchos paneles que hayan llegado al final de su vida útil a partir del año 2014.

9. VALIDACIÓN DEL MODELO BASE

Para saber si el modelo es lo suficiente consistente, se procede a su validación, algunos de los métodos probados son los siguientes:

- **Gráficas coherentes:** Como se ha visto en el punto anterior, la cantidad de material del modelo del Teluro se agotaba en el año 2040 aproximadamente, al igual que en la siguiente gráfica encontrada, pues se llega a su punto máximo de Hubbert a partir del cual, en el caso de que quedaran reservas, costaría mucho extraerlas y no saldría rentable hacerlo por lo que se dejarían de producir las células de TeCd.

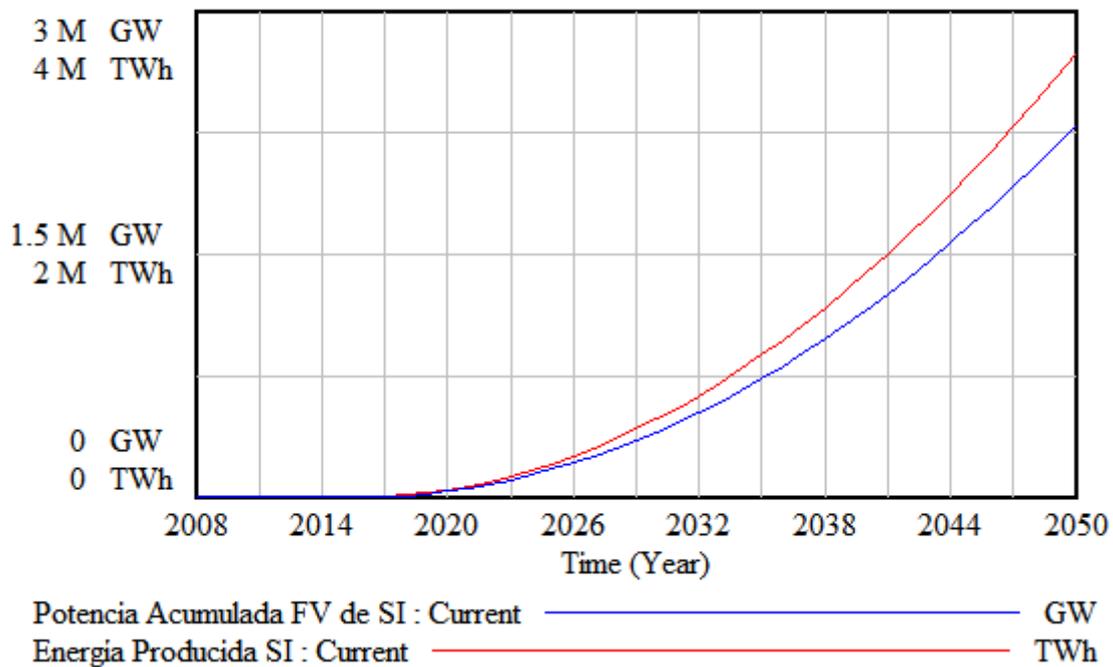


Fuente Imagen [61]

- **Tests de verificación de la estructura del modelo:** Se ha comparado la estructura del modelo (las gráficas del punto anterior) con la estructura del sistema real que el modelo representa o se quería representar, el expuesto en la explicación de relaciones causales entre variables. Se puede ver que todas coinciden, por ejemplo si la instalación FV aumenta, la cantidad de material que se debe extraer es mayor para conseguir al año siguiente la misma tendencia de subida y las demás igual. Así, la estructura del modelo no contradice el conocimiento disponible acerca de la estructura real, es correcto.
- **Test de condiciones extremas:** Se exponen las variables a datos que no coinciden con la realidad, serían casos irreales y se prueba si el modelo da resultados coherentes (cuando no deberían darlos). Para este caso hemos sometido la variable global o común de todos los materiales "Porcentaje Incremento de Instalación" a un valor de 100 en vez de estar entre los

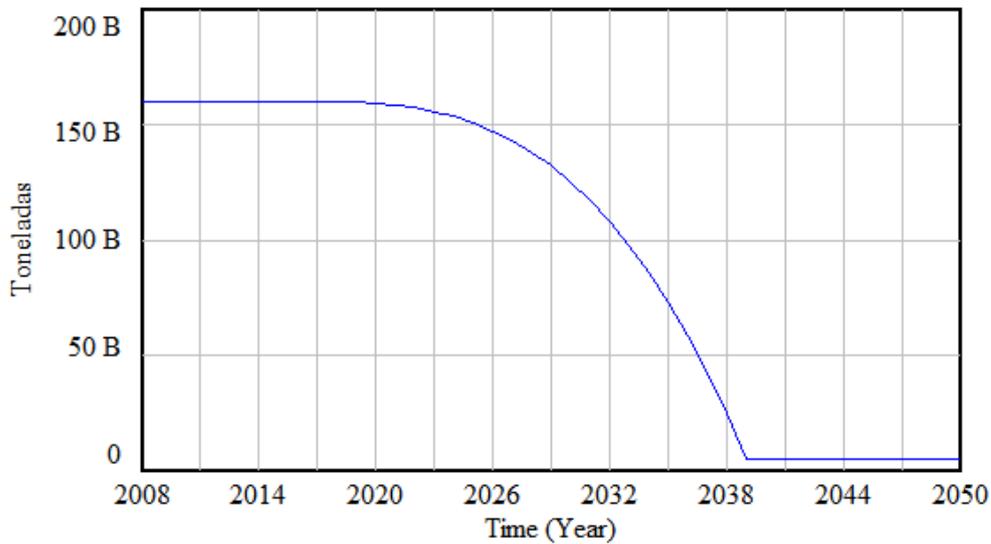
valores de (-2,5 del escenario pesimista, 0.04 escenario medio, 9 escenario optimista) que estaba puesto, esto quiere decir que la tendencia que debería seguir el incremento de cantidad de potencia instalada sería descomunal, con lo que se aumentaría de forma exponencial la potencia instalada y energía generada siempre y cuando quedara material.

Potencia Instalada SI VS Energía Producida SI



Se puede ver que las dos aumentan, como es lógico.

Reservas Conocidas SI Anuales



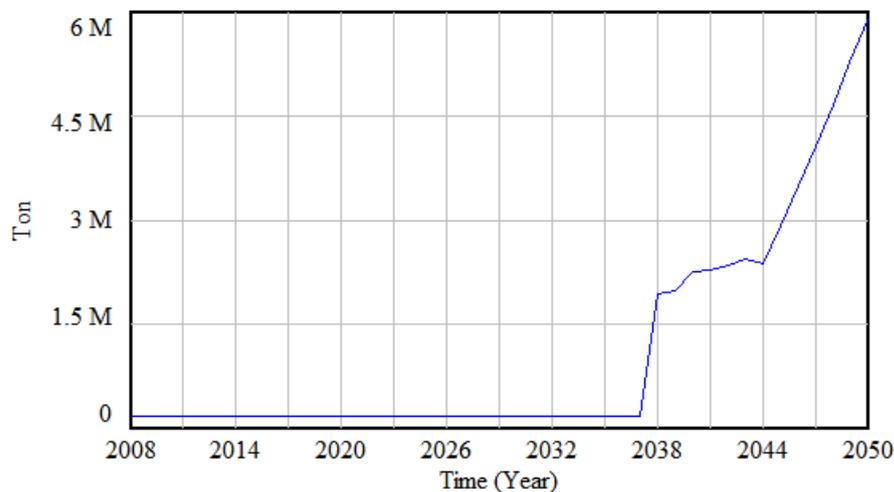
Reservas Conocidas SI Anuales : Current

Pero al ser el despliegue de tecnología tan descomunal, las reservas se agotan, incluso las del silicio que son casi ilimitadas. Se puede decir que el modelo cumple su función.

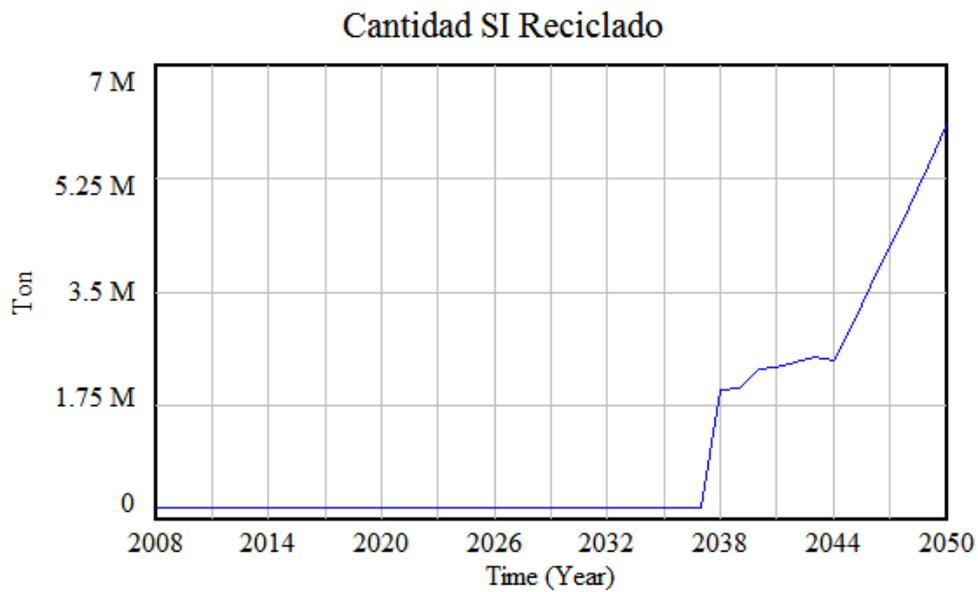
- **Test de sensibilidad:** Se cambia un dato con pequeña diferencia respecto al que estaba funcionando y con esto se ve la sensibilidad del modelo antes pequeños cambios, si el cambio es insignificante, su resultado también debería serlo. Para ello, se cambia el porcentaje de reciclaje del silicio de 72.85/100 a 75/100, dando como resultado:

Con reciclaje = 72.85/100

Cantidad SI Reciclado



Con reciclaje = 75/100



Son muy parecidos, la diferencia que pueda haber son las toneladas que se diferencian en el %, pero no da cifras disparatadas al variar el dato.

10. POSIBLES ESCENARIOS FUTUROS

10.1 ESCENARIO PESIMISTA – INSTALACIÓN FV ACUMULADA DE 1 TW EN EL AÑO 2050

Como se expuso en otros puntos del proyecto, se parte de la hipótesis de que actualmente la energía fotovoltaica cubre un 0,85 % de la demanda de electricidad total en el mundo. Se quiere llegar en el año 2050 a cubrir un 5 % como escenario pesimista, en el cual se estima que habrá un incremento de instalación FV negativo (-2,5 % anual), esto quiere decir que los datos de potencia instalada anuales para cada material van a ir en decremento, pero se va a seguir acumulando potencia, tanta como para llegar a tener 1 TW, sólo que ese incremento será más lento que en el escenario medio o modelo base.

Junto a este cambio se tiene que la proporción entre potencia instalada acumulada y energía producida de 1/5.5 (escogido por el nivel de insolación, pues en el escenario medio y optimista es lógico pensar que al realizarse tanto despliegue de paneles solares se instalen en sitios donde las condiciones de insolación no son óptimas, influyendo esto en la eficiencia energética y con ello generándose menos energía) va a cambiar, ahora será de 1/5 debido a que al haber menos despliegue, habrá más energía producida pues los paneles solares se pondrán en lugares donde las condiciones solares sean más óptimas.

Los demás factores se consideran los mismos que para el modelo base, eficiencia de células sin variar, % de material utilizado para la industria FV de los años históricos sin variar, al igual que el porcentaje de material reciclado, los costes de extracción-producción y los % de cantidad de células FV en el mundo así como sus porcentajes de material dentro de cada una de ellas.

Este escenario de descenso de potencia instalada implica, de algún modo, una reducción en la actividad económica. La creciente dependencia de recursos renovables con menor densidad de energía, con el tiempo cambiaría la estructura de la sociedad, hasta reflejar muchas de las reglas básicas de diseño, e incluso detalles, de las sociedades preindustriales [74].

Este escenario podría empeorar más si esto fuera realidad:

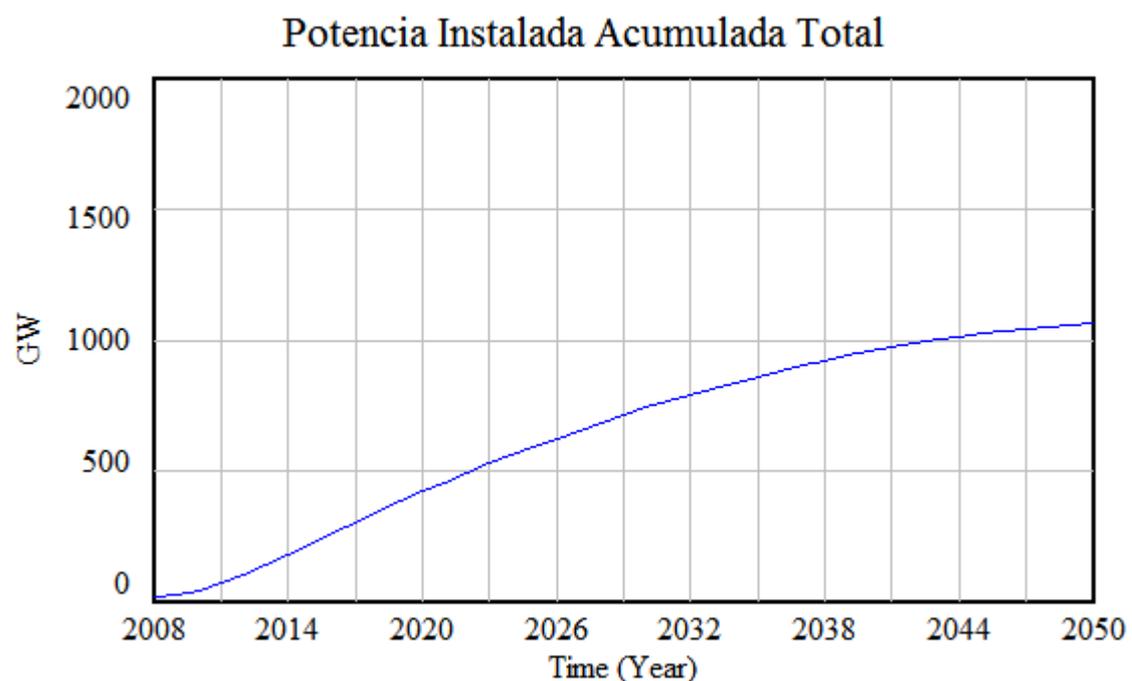
- Mayores costes de reciclaje que de extracción.
- Poca apuesta por las Energías renovables
- No Sostenibilidad
- No Inversiones/No PIB/No emisiones CO2

- Se descubren menos recursos nuevos al año

Pero un descenso energético es generalmente visto como poco realista, derrotista y políticamente contraproducente, a pesar de que muchos activistas [74] que promueven estrategias de sostenibilidad reconocen en privado que el Descenso Energético es tal vez inevitable. La rápida acumulación de pruebas sobre el cambio climático y el cénit de la oferta de petróleo mundial, por ejemplo, hacen probable algún tipo de descenso energético a largo plazo, a pesar de la profunda negación estructural y psicológica de estas evidencias.

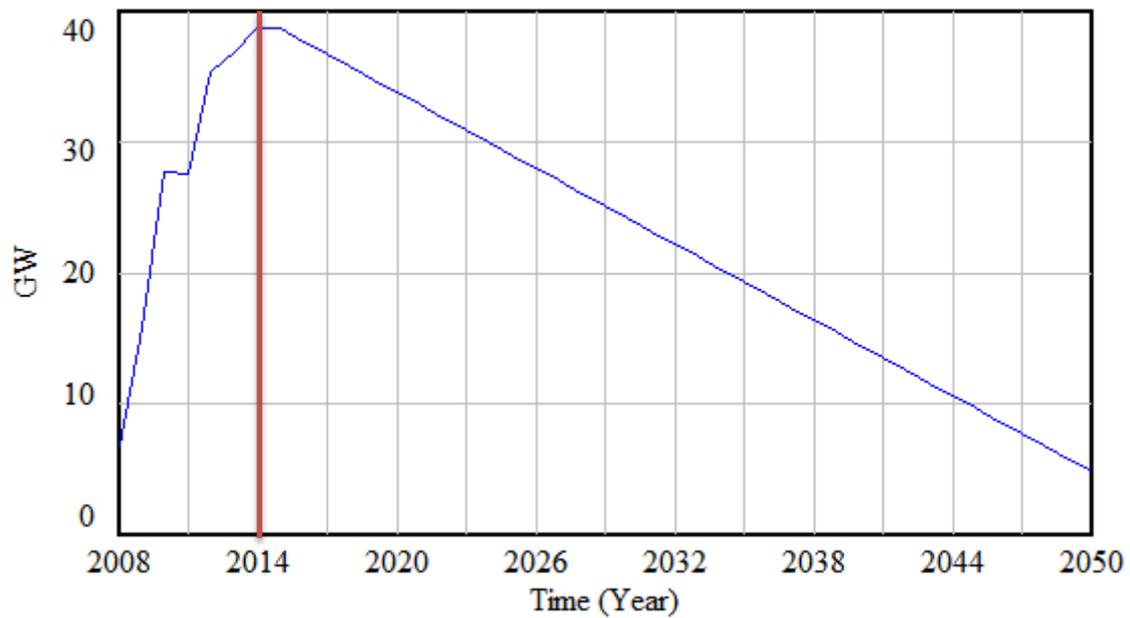
Por todo ello, hay que enfocar nuestra atención en las fortalezas y debilidades de varias estrategias de adaptación a los diferentes escenarios, se puede ver el DAFO realizado en este proyecto, para que el futuro no nos pille desprevenidos.

Las conclusiones obtenidas con este escenario pesimista son:



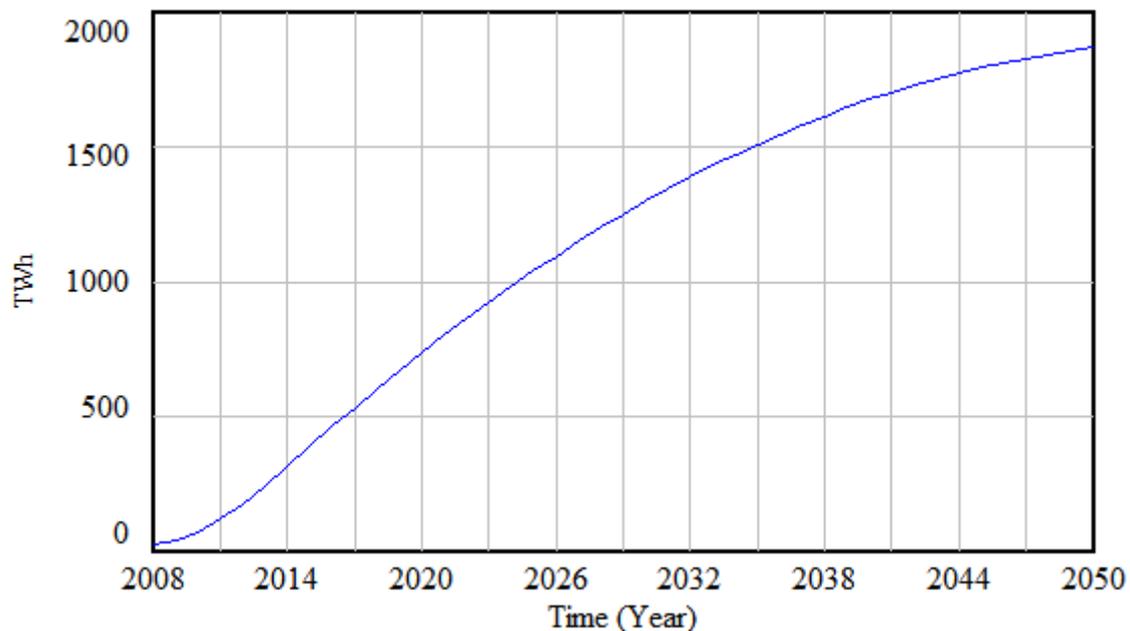
Se llega aproximadamente a 1 TW de potencia instalada acumulada en el año 2050 como se quería, mediante la reducción de la potencia instalada anual global:

Potencia Instalada FV de SI 0



Esto implica que la energía producida o generada por esos paneles fotovoltaicos es:

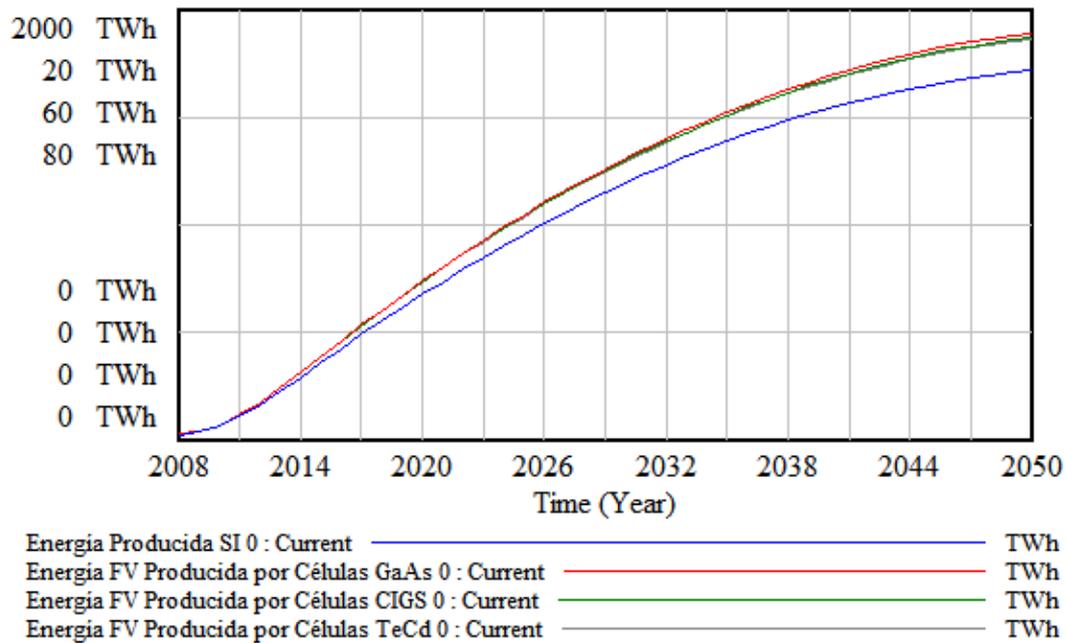
Energía TOTAL Producida por células FV 0



Cercana a los 2000 TWh que se deberían de obtener.

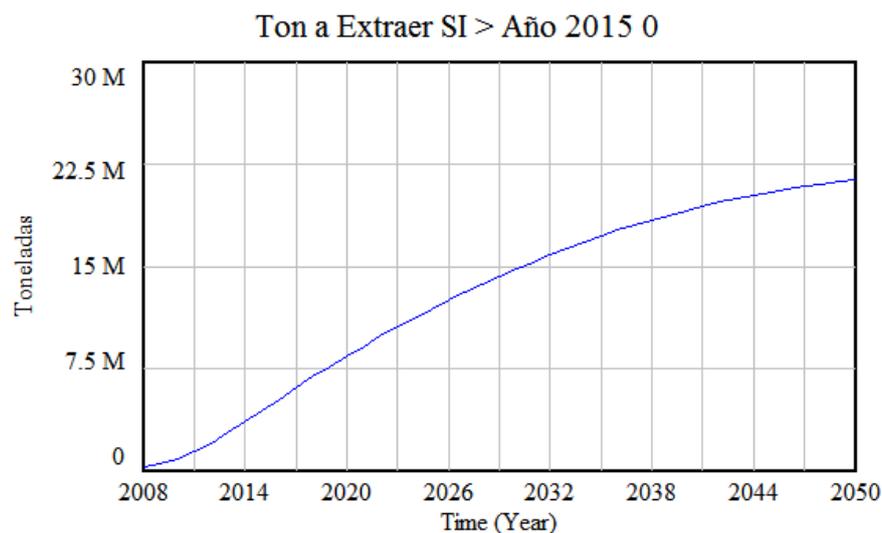
Ésta cantidad de energía generada, vista desagregada por tipos de células queda:

Energía Producida según el tipo de célula FV



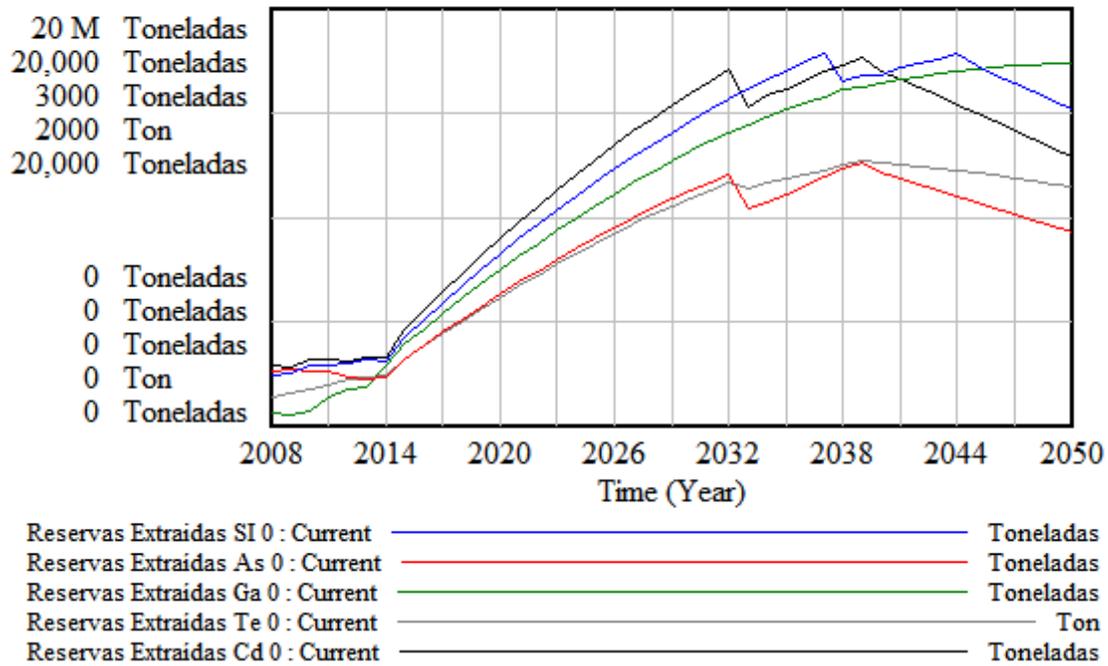
Donde se ve, por su cifra, que el silicio es el que más energía aporta al mix energético mundial puesto que hay un 92 % de paneles fabricados con silicio (cristalino, policristalino y amorfo).

Para que esto llegue a suceder, se necesita tener estas cantidades de material en la variable de “Ton a Extraer SI > Año 2015”, ejemplo silicio:

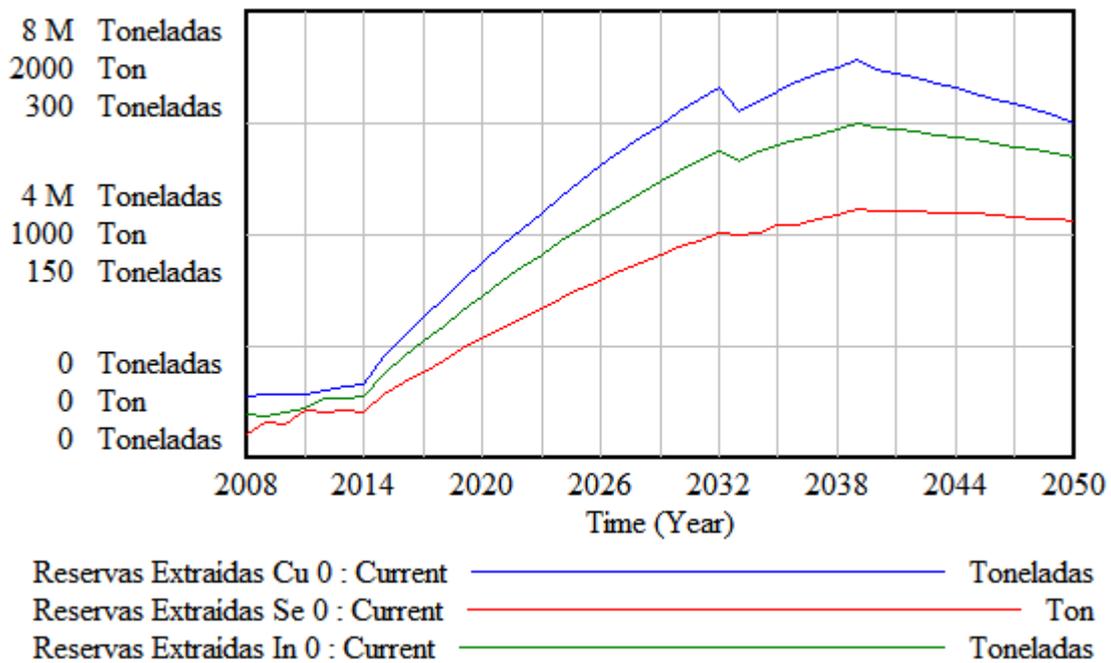


Respecto a la extracción de los distintos materiales (extracción menos reciclaje) se tiene:

Extracción de los Materiales

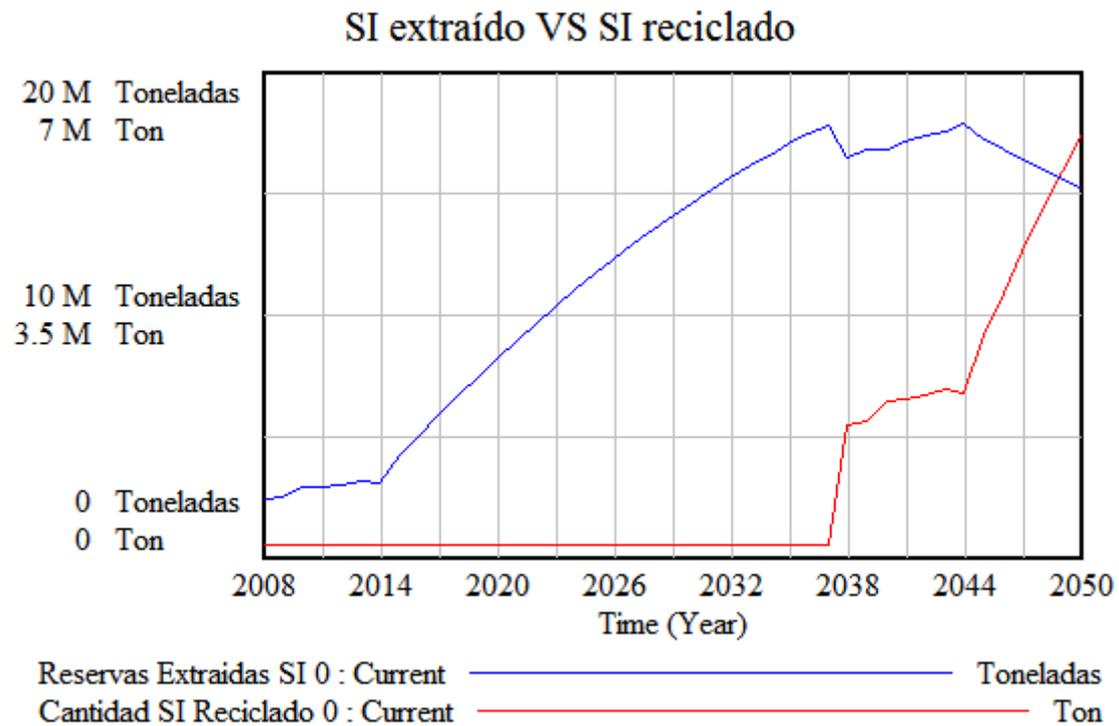


Extracción de Materiales



Vemos que a partir del año en que entra en juego el reciclaje, la extracción disminuye puesto que al reciclar más material, se debe extraer menor material de las minas pues se usaría el proveniente del reciclado. A medida que va

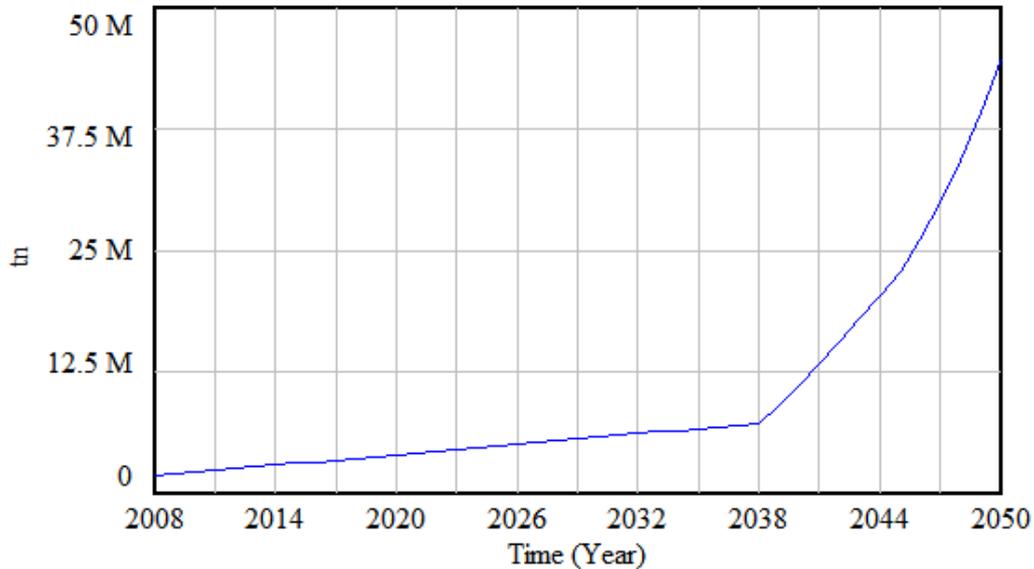
aumentando éste, las cantidades extraídas van disminuyendo en todos los materiales. Aunque para que el reciclaje logre cubrir toda la demanda de extracción de material se debería reciclar mucho más y en años anteriores, ocurre lo mismo que en el modelo base (ejemplo silicio):



También, respecto a los datos de extracción históricos se puede decir que para llegar en el año 2050 a tener 1 TW de instalación las cantidades de material a extraer tienen que ser grandes por eso aumentan tanto.

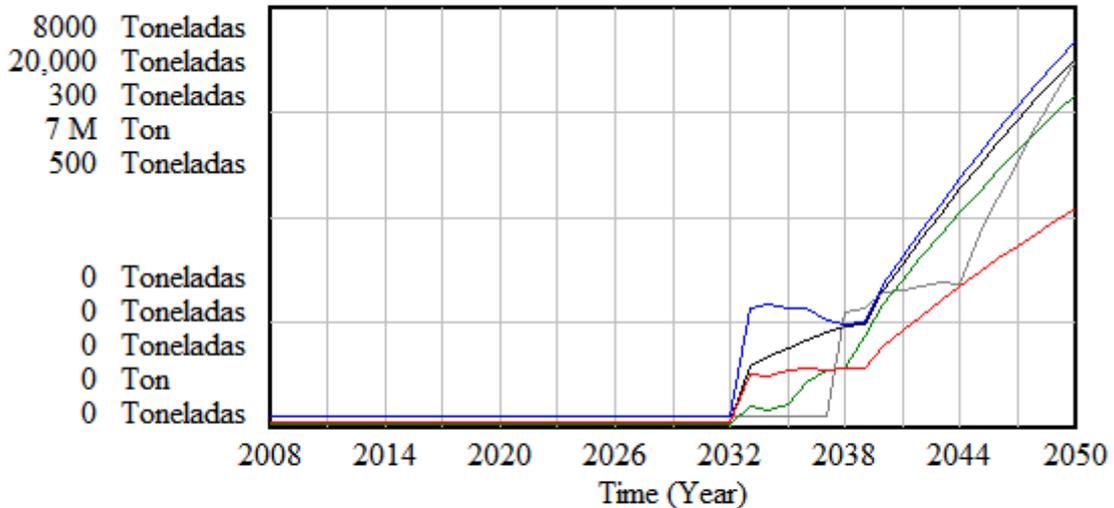
Respecto al reciclaje, se tiene que en cada material, va a ir acumulándose de la siguiente forma para cada material, ejemplo el silicio:

Tn SI Reciclado 0



Y concretamente, en cada año se tiene:

Cantidades de Material Reciclado 1

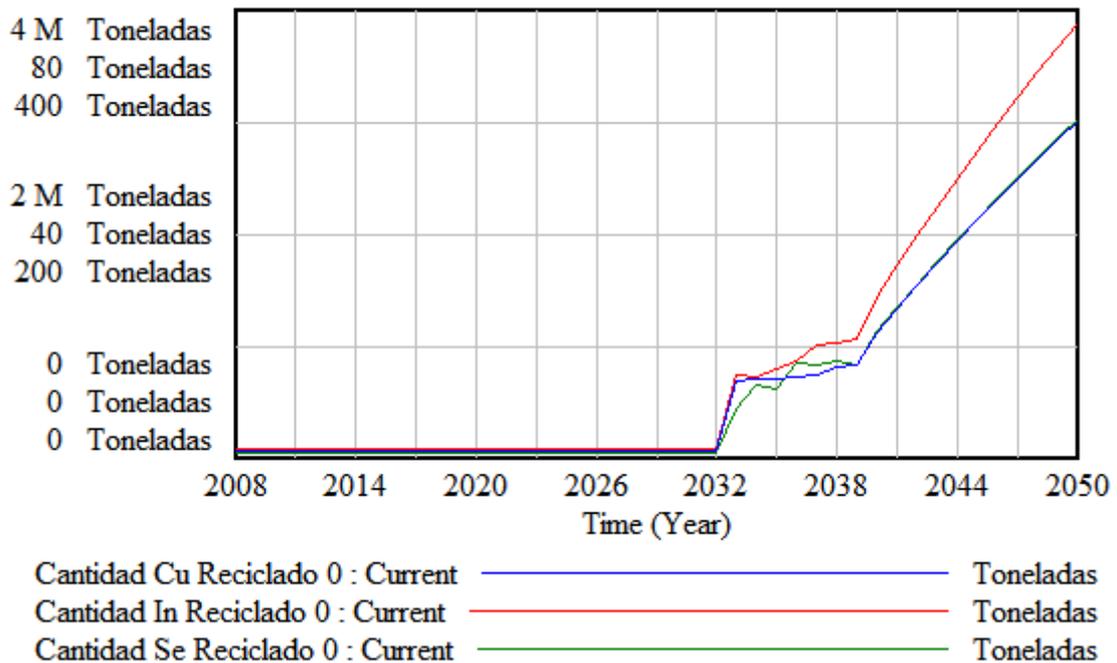


Cantidad As Reciclado 0 : Current — Toneladas
Cantidad Cd Reciclado 0 : Current — Toneladas
Cantidad Ga Reciclado 0 : Current — Toneladas
Cantidad SI Reciclado 0 : Current — Ton
Cantidad Te Reciclado 0 : Current — Toneladas

Que coinciden con las del modelo base prácticamente, se nota que el silicio empieza a reciclarse más tarde debido a su ciclo de vida de los paneles y el arsénico lo hace en forma de subida rápida, descenso y subida, ese descenso se expuso que se debía a las cantidades producidas históricas que entre los años

2008 y 2014 disminuían, pero posteriormente tenían que subir para poder llegar a 1 TW de potencia instalada en 2050.

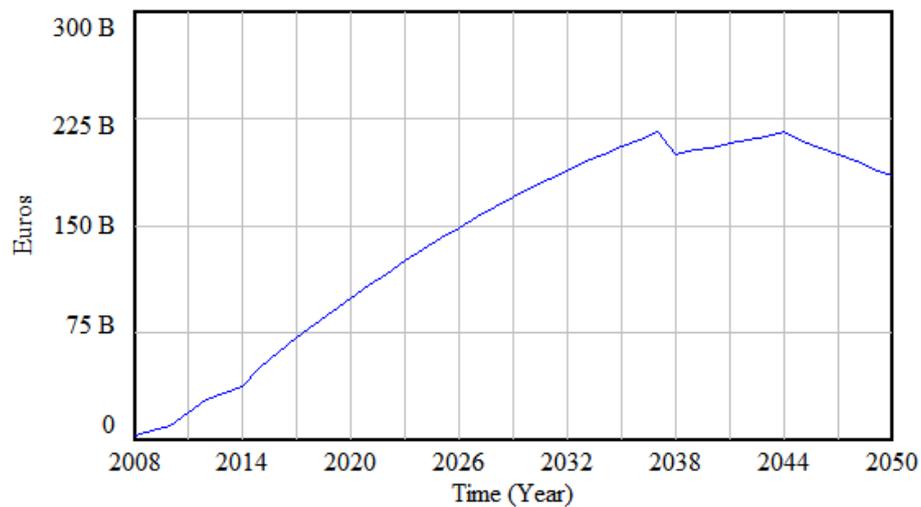
Cantidades de Material Reciclado 2



Sobre los demás materiales, se visualiza que siguen una tendencia clara hacia el aumento de reciclaje, como se veía en la gráfica de reciclaje acumulado.

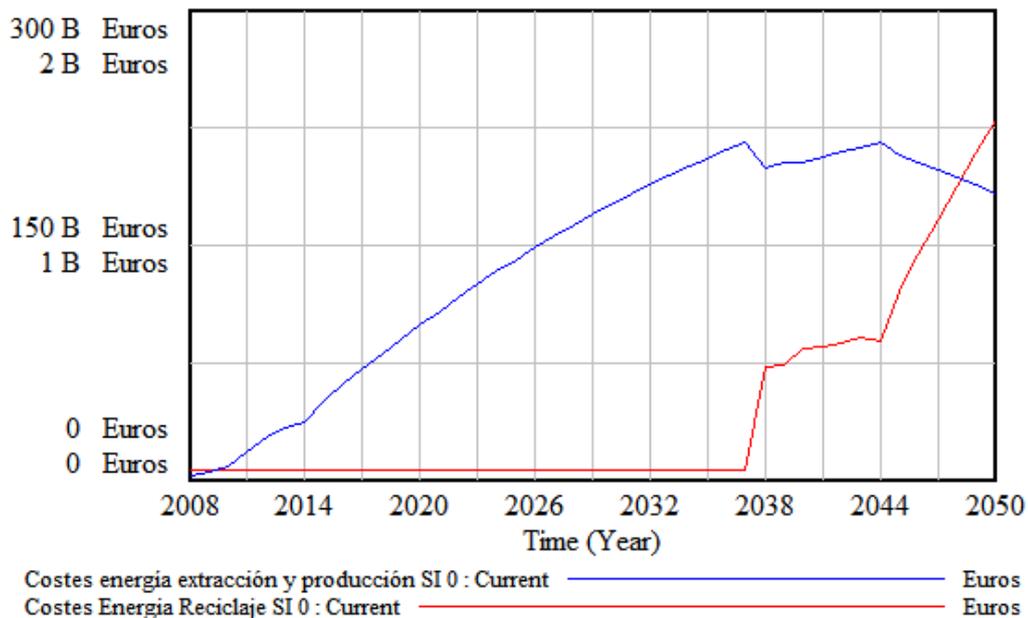
Cada material posee unos costes de extracción, producción y reciclaje distintos, como ejemplo se tienen los del silicio:

Costes Energéticos Totales Silicio 0



En los cuales se pueden apreciar la disminución de tendencia creciente en los años en los que empieza a recibirse el reciclaje de material proveniente del año 2008 y sucesivos. Esta pequeña disminución también se hace visible en el siguiente gráfico comparando los costes de extracción-producción y los de reciclaje:

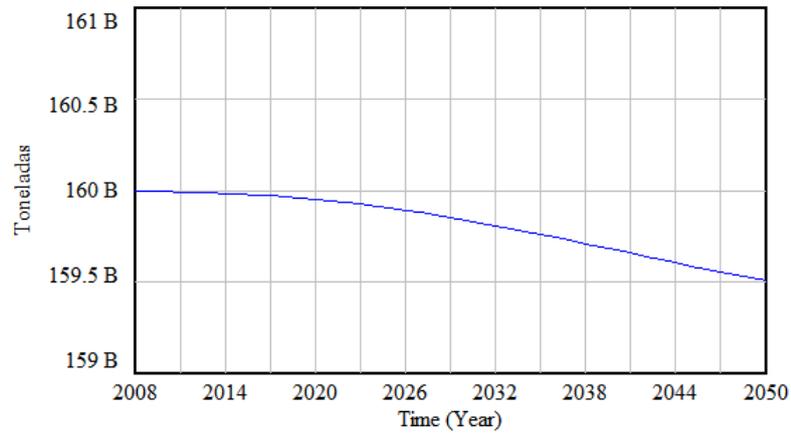
Comparativa Costes de Extracción-Producción VS Costes Reciclaje



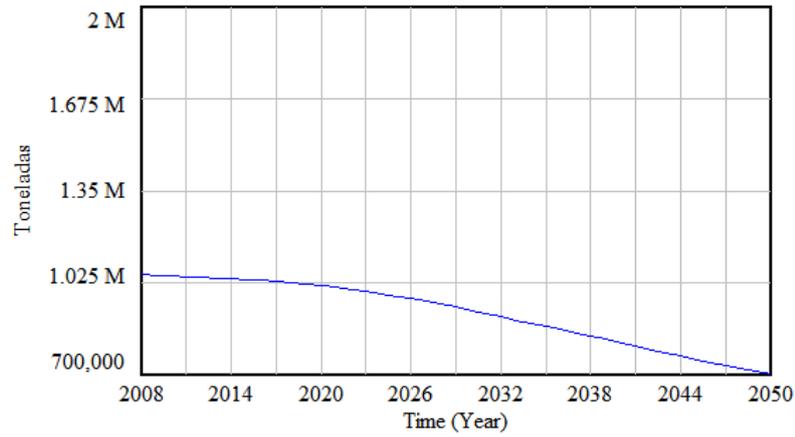
A medida que se van acabando las reservas, los costes de extracción deberían ser mayores (según la teoría de Hubbert) y los de reciclaje menores, pero en el gráfico se puede ver que para que esto ocurra, el reciclaje tiene que ser mayor, pues se siguen extrayendo grandes cantidades de material hasta el año 2047, a partir del cual los costes de reciclaje sustituyen a los de extracción por haber más cantidad reciclada y ahí es donde el coste de reciclaje podría ser menor pues ahora y en adelante era constante (habría que hacer un análisis de costes, lo cual no entra en el temario de este proyecto).

Y llegado a este punto, se exponen las reservas que quedan de cada material después de haber realizado el despliegue hacia 1 TW:

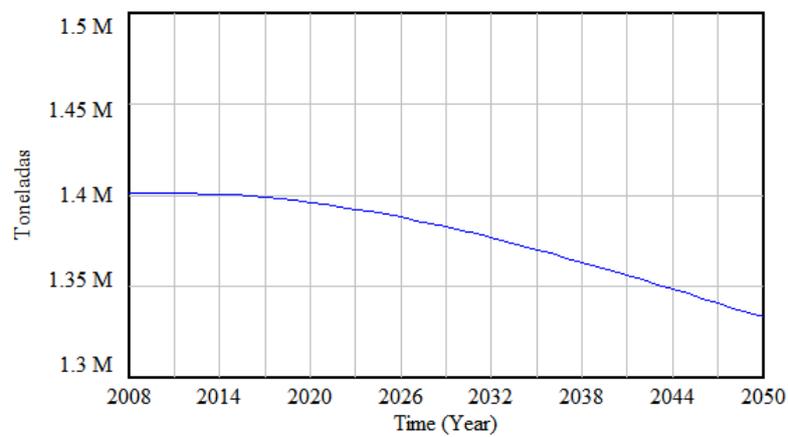
Reservas Conocidas SI Anuales 0



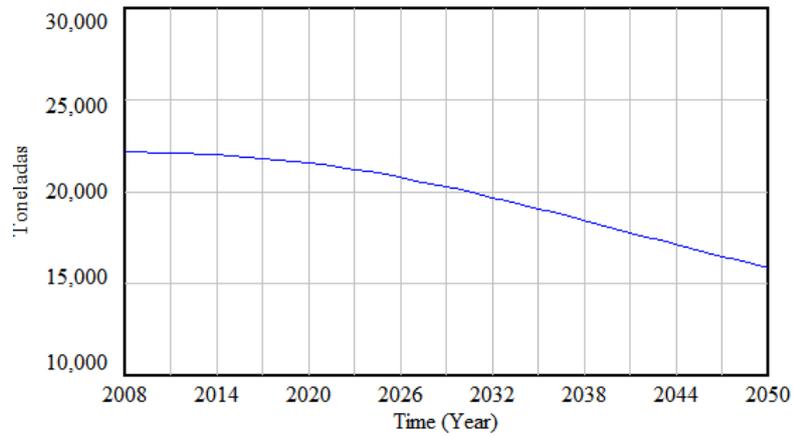
Reservas Conocidas As Anuales 0



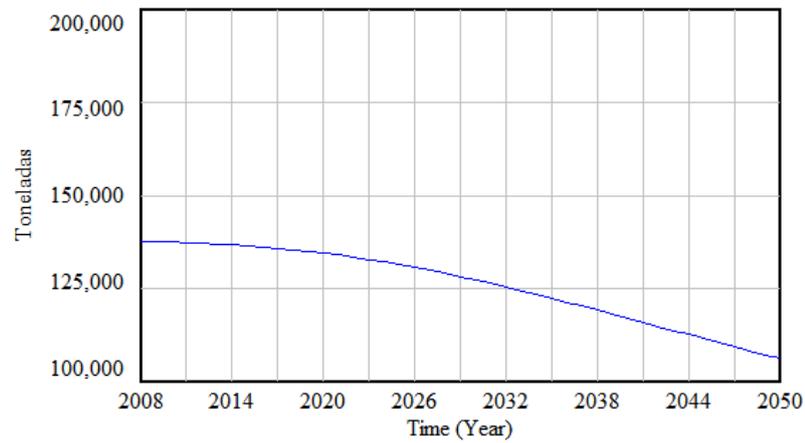
Reservas Conocidas Ga Anuales 0



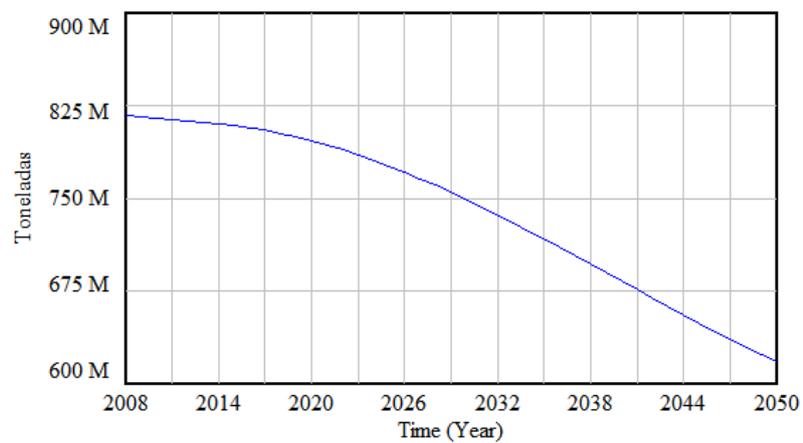
Reservas Conocidas In Anuales 0

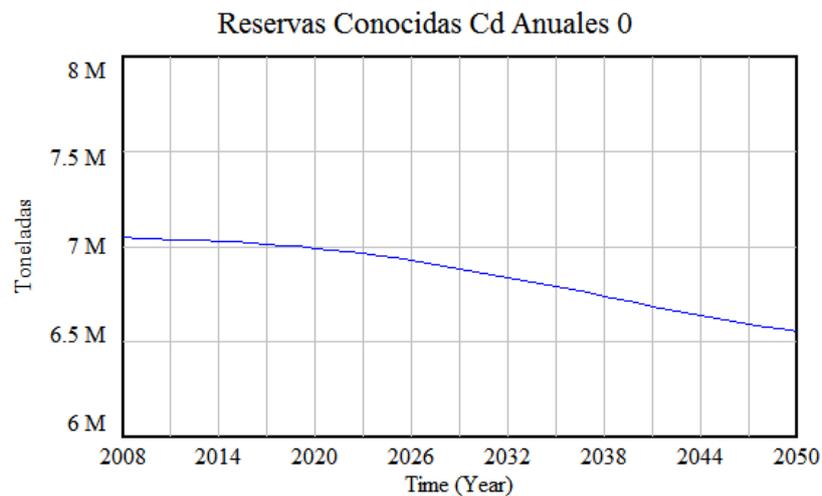
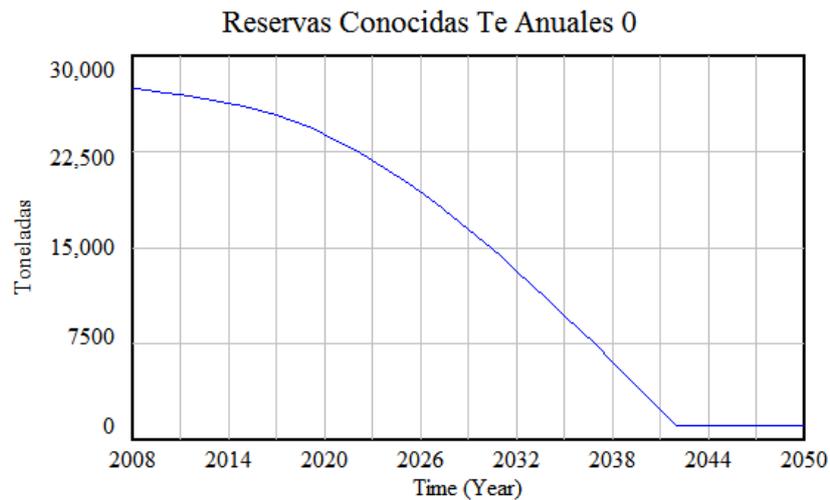


Reservas Conocidas Se Anuales 0



Reservas Conocidas Cu Anuales 0





Como se puede apreciar, ninguno de los materiales llega a agotarse (debido a que al ser paneles de lámina delgada utilizan poco material, excepto los de silicio que usan más pero también existen muchas más reservas de este material, casi ilimitadas), solamente el telurio se acaba (es el material que menos reservas conocidas tenía) por lo que las células de TeCd se ven limitadas por el telurio, puede que dentro de unos años no se puedan fabricar a no ser que se recicle mucho más, mientras que los demás tipos de células parece que no tendrán problemas en cuanto a material se refiere, aunque no quiere decir que no tengan obstáculos como se expuso, costes, gobiernos, primas, etc.

10.2 ESCENARIO OPTIMISTA – INSTALACIÓN ACUMULADA DE 4 TW EN EL AÑO 2050

Como se expuso en otros puntos del proyecto, se parte de la hipótesis de que actualmente la energía fotovoltaica cubre un 0,85 % de la demanda de electricidad total en el mundo. Se quiere llegar en el año 2050 a cubrir un 15 % como escenario optimista, en el cual se estima que habrá un incremento de instalación FV positivo (9 % anual), esto quiere decir que los datos de potencia instalada anuales para cada material van a ir incrementándose y se va a seguir acumulando potencia, tanta como para llegar a tener 4 TW con lo que ese incremento será más rápido y grande que en el escenario medio o modelo base.

Los demás factores se consideran los mismos que para el modelo base, eficiencia de células sin variar, % de material utilizado para la industria FV de los años históricos sin variar, al igual que el porcentaje de material reciclado, los costes de extracción-producción y los % de cantidad de células FV en el mundo así como sus porcentajes de material dentro de cada una de ellas.

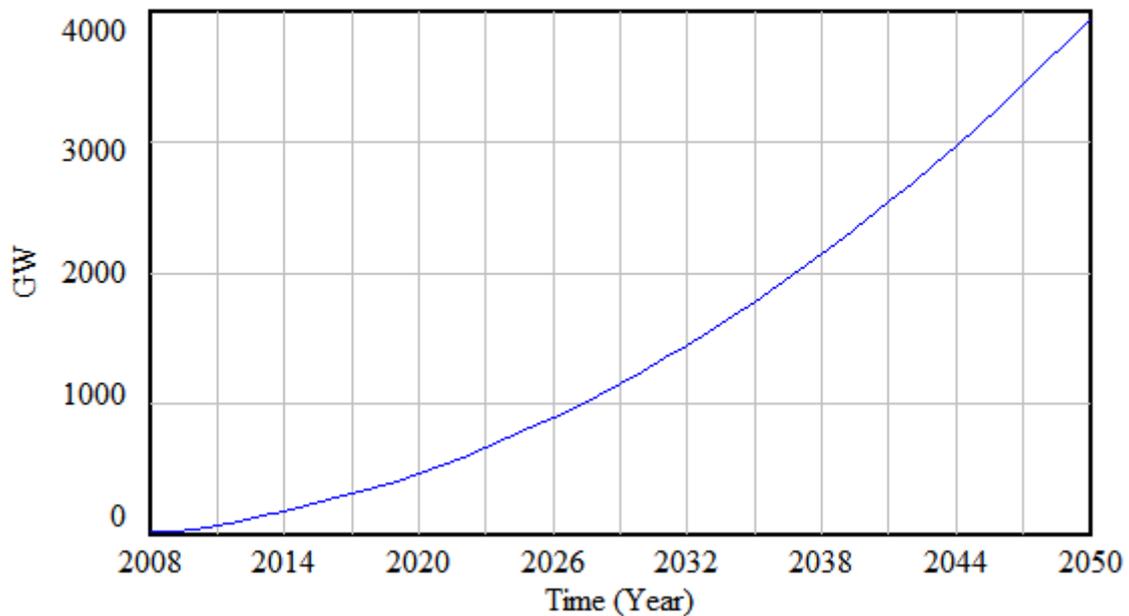
Para que se realice tal despliegue de tecnología en este escenario, dependemos de fuentes de energías nuevas, grandes y concentradas que permitan el crecimiento continuo de la riqueza material y del poder humano sobre las limitaciones medioambientales, al mismo tiempo que crece la población [74].

Este escenario podría mejorar más si esto fuera realidad:

- Se descubren más recursos nuevos al año
- Sostenibilidad
- Gran apuesta por las Energías renovables
- Inversiones/PIB/emisiones CO2
- Menores costes de reciclaje que de extracción.
- Bajada de los precios de las tarifas
- Aumento de investigación e innovación
- Aumento de reciclaje.

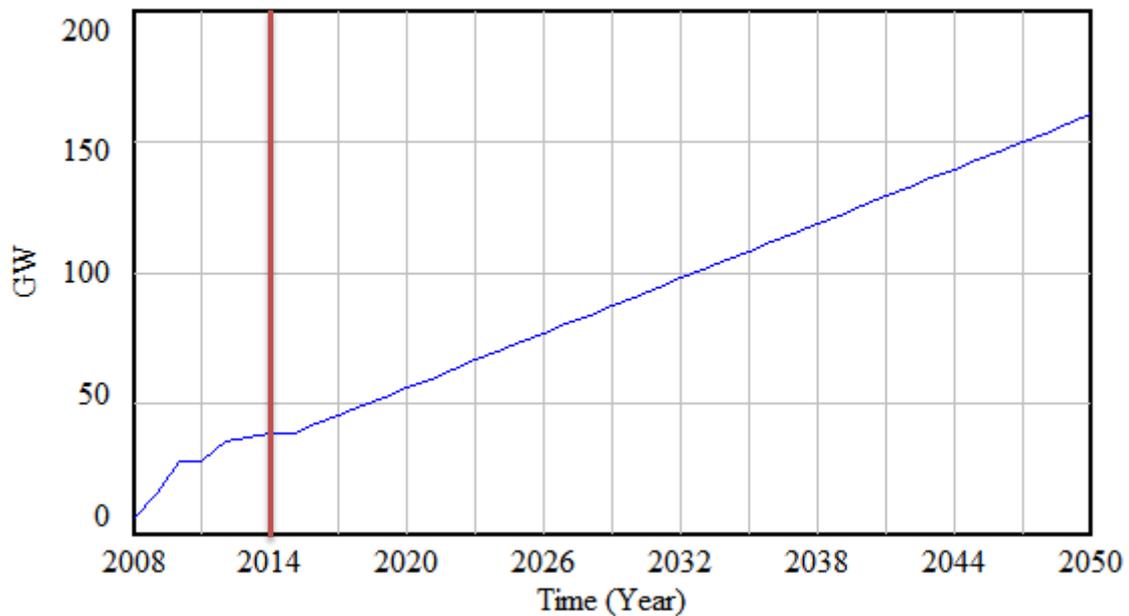
Las conclusiones obtenidas con este escenario optimista son:

Potencia Instalada Acumulada Total



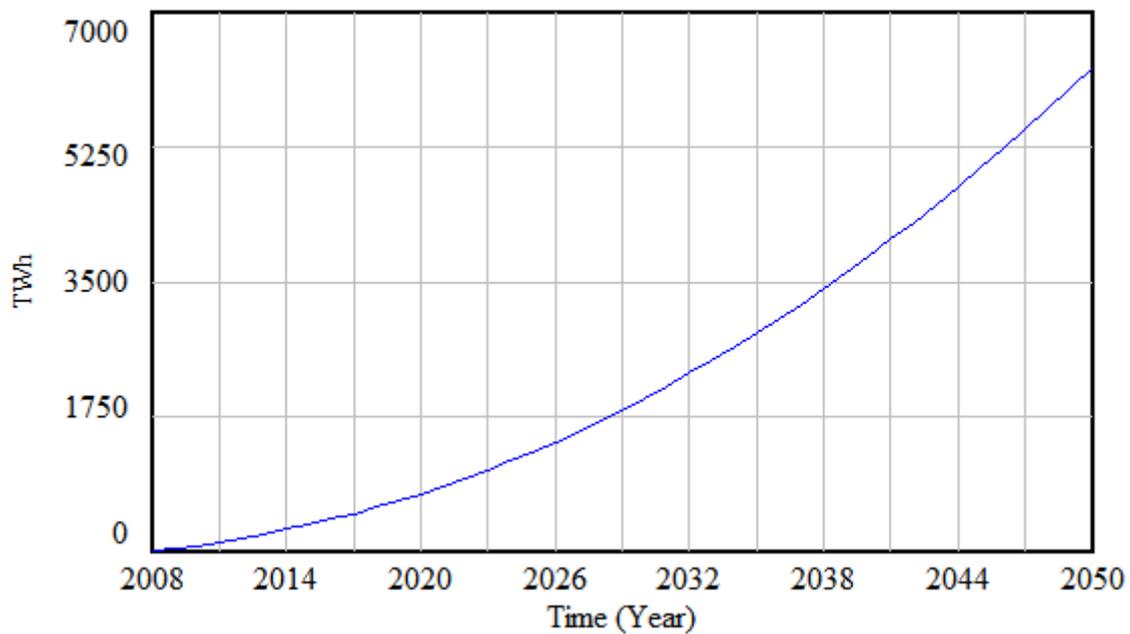
Se llega aproximadamente a 4 TW de potencia instalada acumulada en el año 2050 como se quería, mediante el aumento de la potencia instalada anual global:

Potencia Instalada FV de SI 0 1



Esto implica que la energía producida o generada por esos paneles fotovoltaicos es:

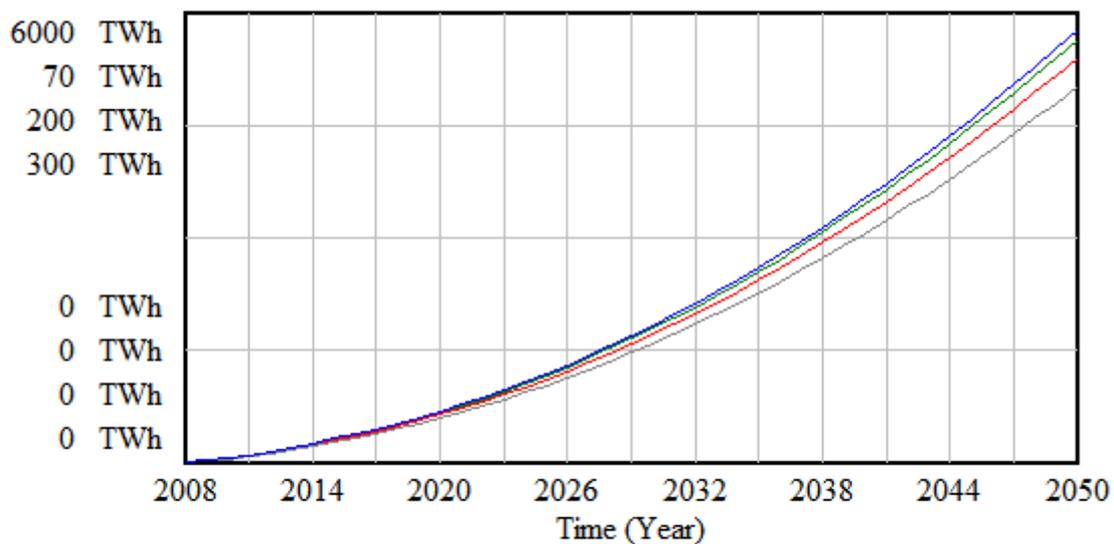
Energía TOTAL Producida por células FV 0 1



Cercana a los 6000 TWh que se deberían de obtener.

Ésta cantidad de energía generada, vista desagregada por tipos de células queda:

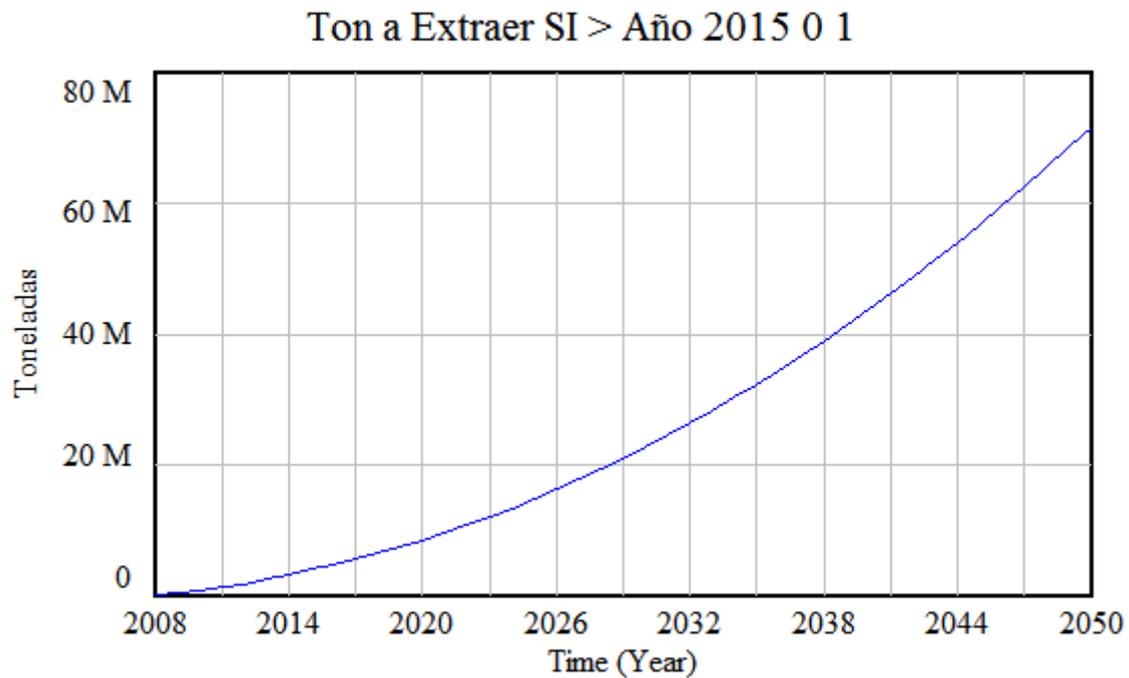
Energía Producida según el tipo de célula FV



Energía Producida SI 0 1 : Current — TWh
Energía FV Producida por Células GaAs 0 1 : Current — TWh
Energía FV Producida por Células CIGS 0 1 : Current — TWh
Energía FV Producida por Células TeCd 0 1 : Current — TWh

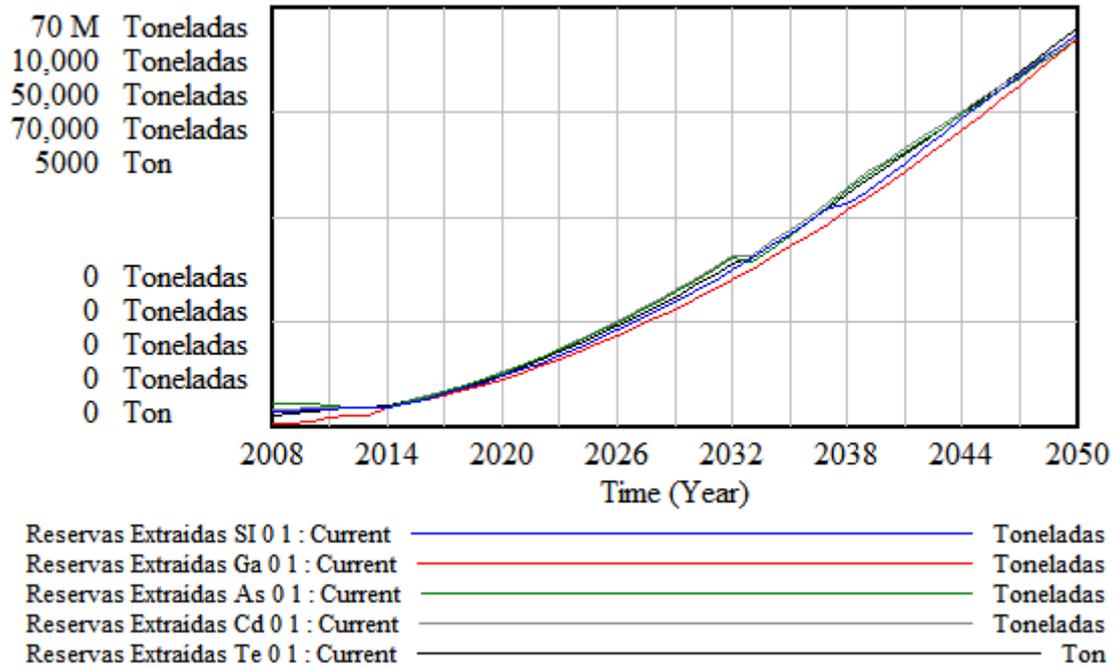
Donde se ve, por su cifra, que en este escenario, al igual que en los anteriores, el silicio es el que más energía aporta al mix energético mundial puesto que hay un 92 % de paneles fabricados con silicio (cristalino, policristalino y amorfo).

Para que esto llegue a suceder, se necesita tener estas cantidades de material en la variable de “Ton a Extraer SI > Año 2015”, ejemplo silicio:

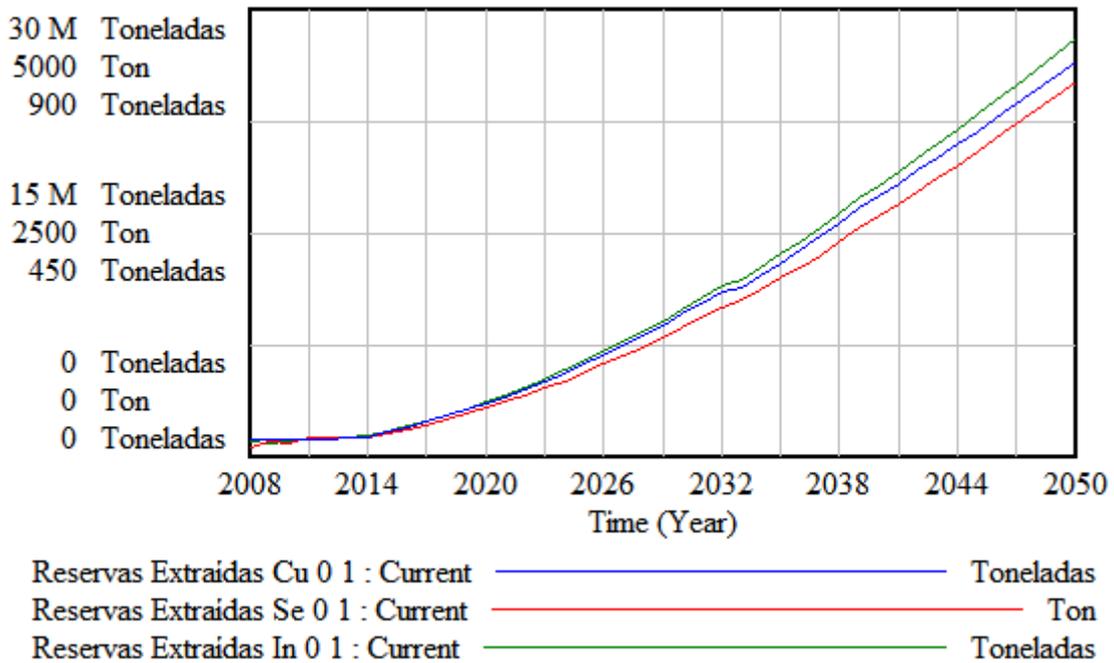


Respecto a la extracción de los distintos materiales (extracción menos reciclaje) se tiene:

Extracción de Materiales 1

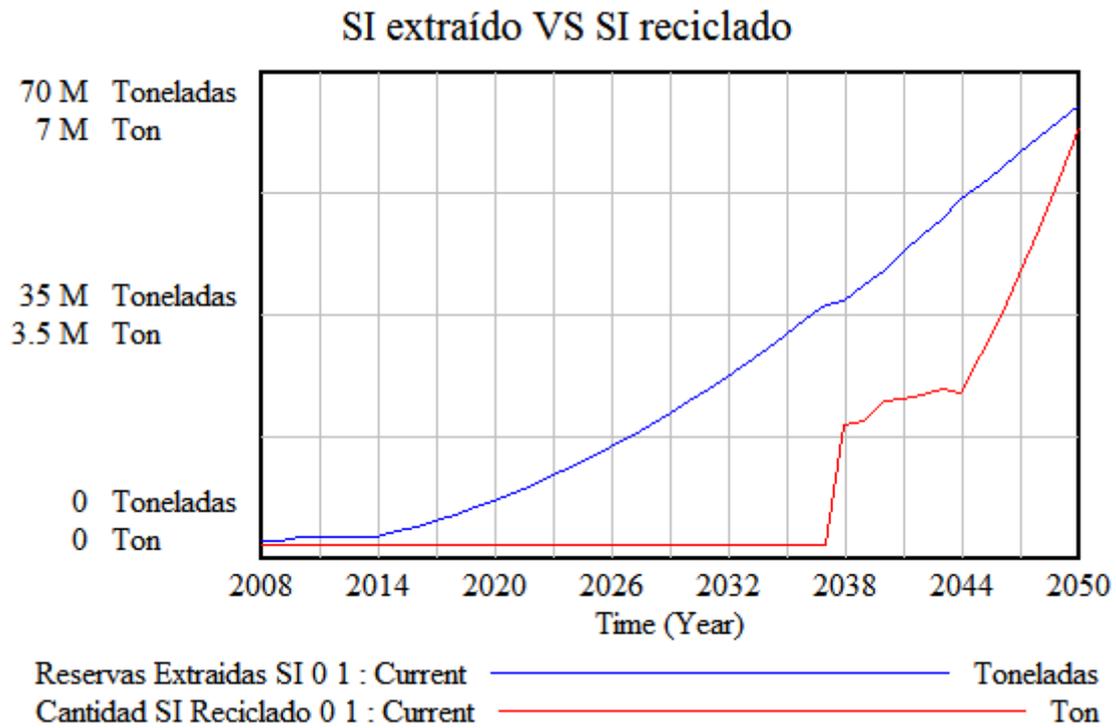


Extracción de Materiales 2



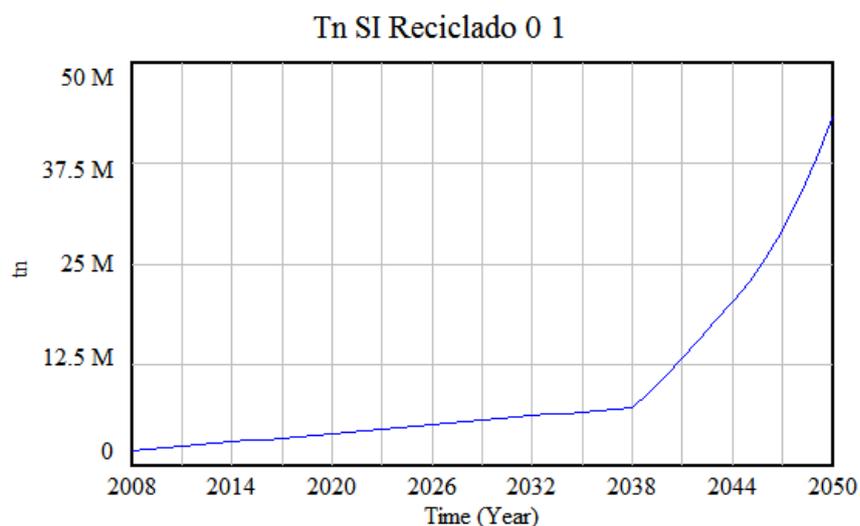
Vemos que a partir del año en que entra en juego el reciclaje, la extracción disminuye ligeramente puesto que al reciclar más material, se debe extraer menor material de las minas pues se usaría el proveniente del reciclado. A medida que va aumentando éste, las cantidades extraídas van disminuyendo en todos los materiales. Aunque para que el reciclaje logre cubrir toda la demanda de extracción

de material se debería reciclar mucho más y en años anteriores, ocurre lo mismo que en el modelo base (ejemplo silicio):

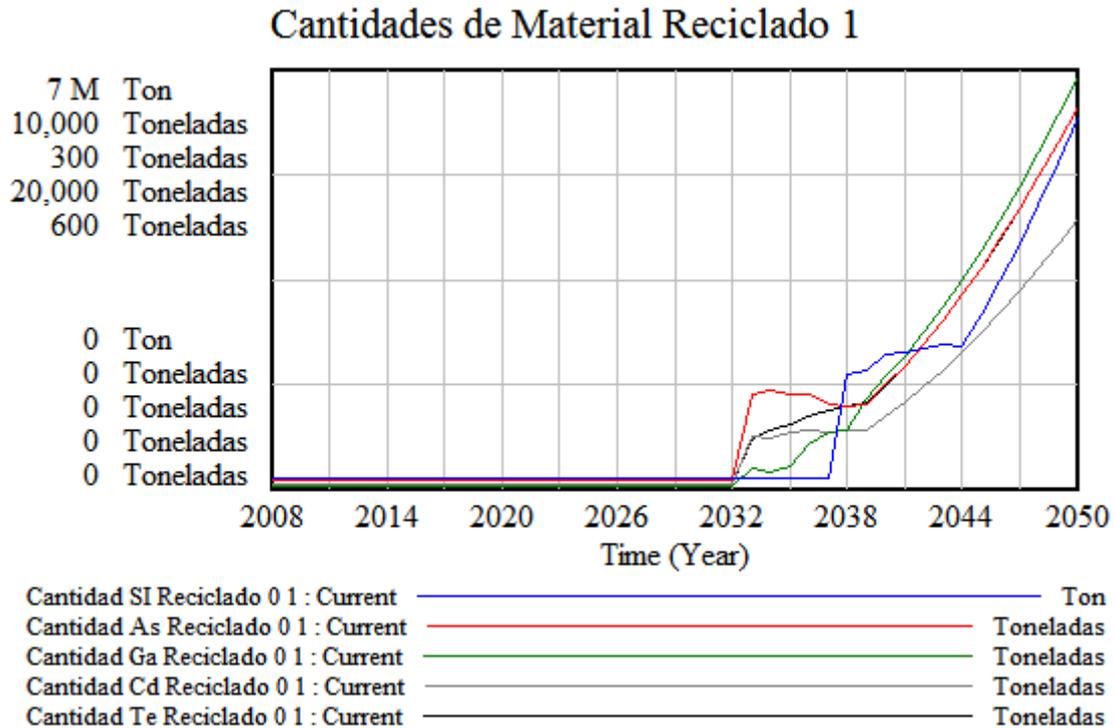


También, respecto a los datos de extracción históricos se puede decir que para llegar en el año 2050 a tener 4 TW de instalación las cantidades de material a extraer tienen que ser grandes por eso aumentan tanto.

Respecto al reciclaje, se tiene que en cada material, va a ir acumulándose de la siguiente forma para cada material, ejemplo el silicio:

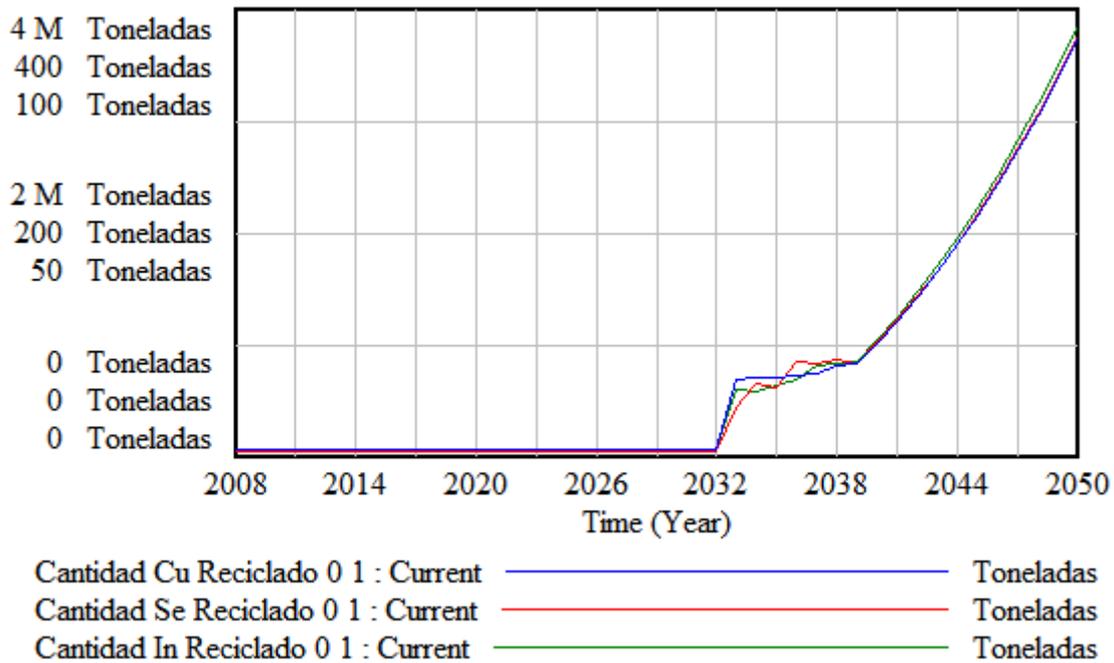


Y concretamente, en cada año se recicla lo siguiente:



Que coinciden con las del modelo base prácticamente, se nota que el silicio empieza a reciclarse más tarde debido a su ciclo de vida de los paneles y el arsénico lo hace en forma de subida rápida, descenso y subida, ese descenso se expuso que se debía a las cantidades producidas históricas que entre los años 2008 y 2014 disminuían, pero posteriormente tenían que subir para poder llegar a 4 TW de potencia instalada en 2050.

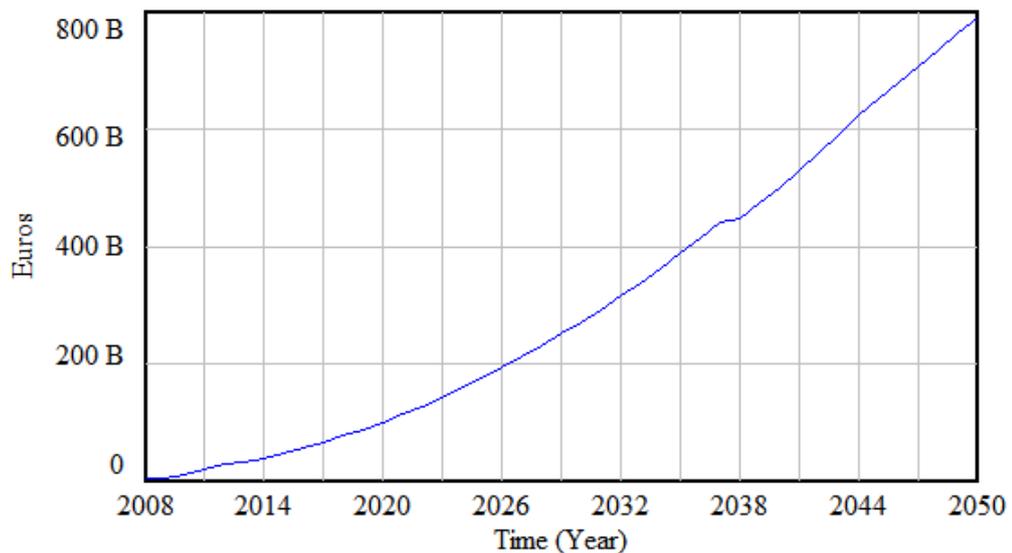
Cantidades de Material Reciclado 2



Sobre los demás materiales, se visualiza que siguen una tendencia clara hacia el aumento de reciclaje, como se veía en la gráfica de reciclaje acumulado.

Cada material posee unos costes de extracción, producción y reciclaje distintos, como ejemplo se tienen los del silicio:

Costes Energéticos Totales Silicio 0 1



En los cuales se pueden apreciar la disminución de tendencia creciente en los años en los que empieza a recibirse el reciclaje de material proveniente del año 2008 y

sucesivos. Esta pequeña disminución también se hace visible en el siguiente gráfico comparando los costes de extracción-producción y los de reciclaje, ejemplo del silicio:

Gráfico del escenario pesimista de 1 TW:

Comparativa Costes de Extracción-Producción VS Costes Reciclaje

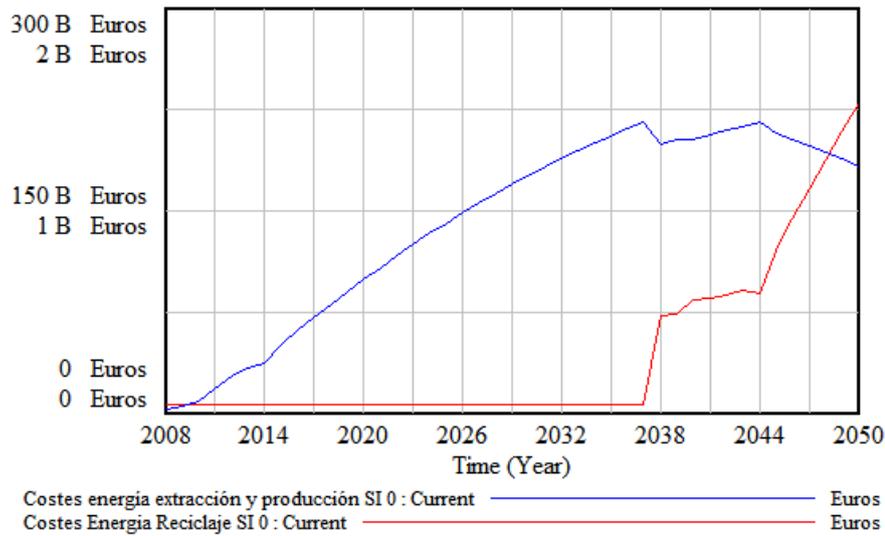
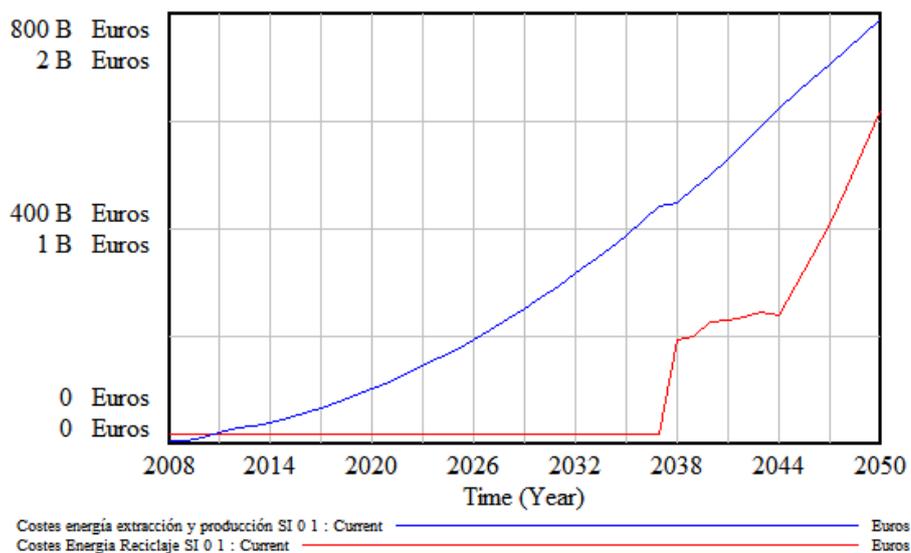


Gráfico del escenario actual, optimista de 4 TW:

Comparativa Costes de Extracción-Producción VS Costes Reciclaje

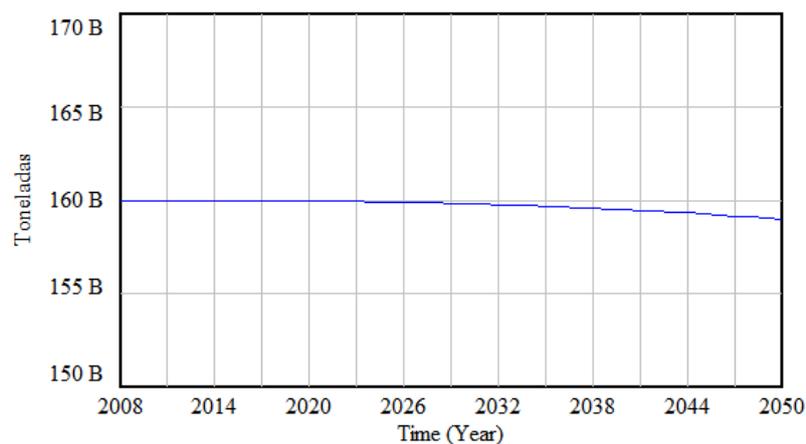


En el primer gráfico del escenario anterior, a medida que se van acabando las reservas, los costes de extracción deberían ser mayores (según la teoría de Hubbert) y los de reciclaje menores, pero en el gráfico se puede ver que para que esto ocurra, el reciclaje tiene que ser mayor, pues se siguen extrayendo grandes cantidades de material hasta el año 2047, a partir del cual los costes de reciclaje sustituyen a los de extracción por haber más cantidad reciclada y ahí es donde el coste de reciclaje podría ser menor pues ahora y en adelante era constante (habría que hacer un análisis de costes, lo cual no entra en el temario de este proyecto).

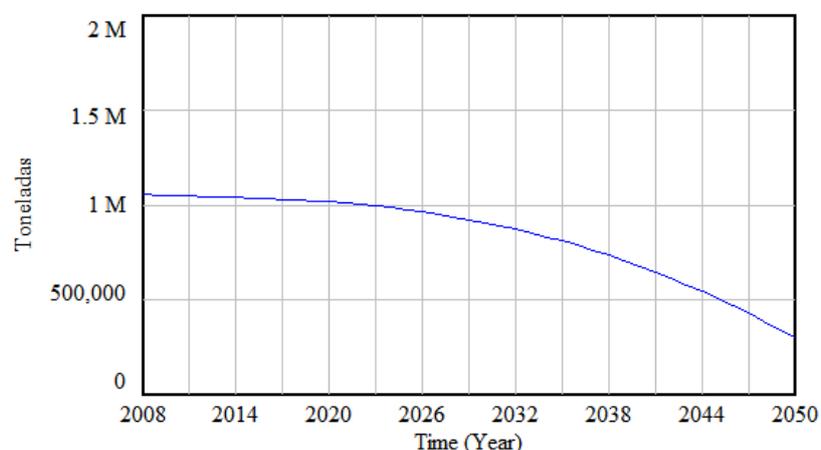
Pero viendo el gráfico del escenario optimista, se puede decir que “no se cruzan”, esto se debe a que para este escenario se tienen que extraer enormes cantidades de material que no se pueden compensar con el reciclaje, por ello los costes de extracción siguen siendo mayores que los de reciclaje.

Y llegado a este punto, se exponen las reservas que quedan de cada material después de haber realizado un enorme despliegue hacia los 4 TW:

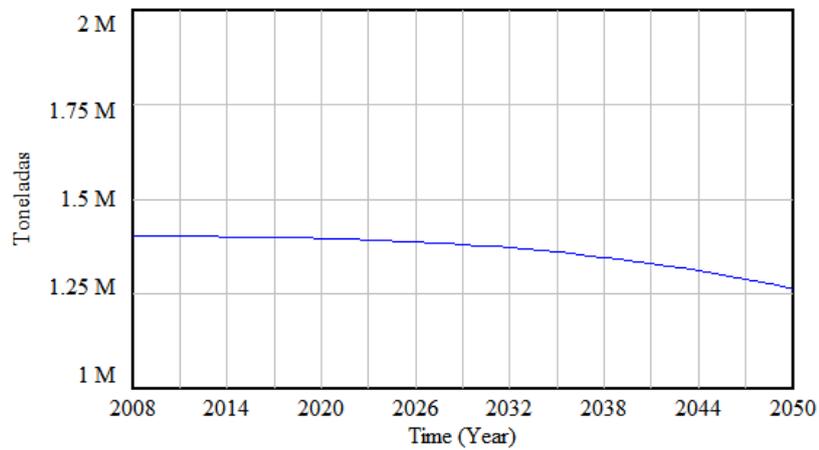
Reservas Conocidas SI Anuales 0 1



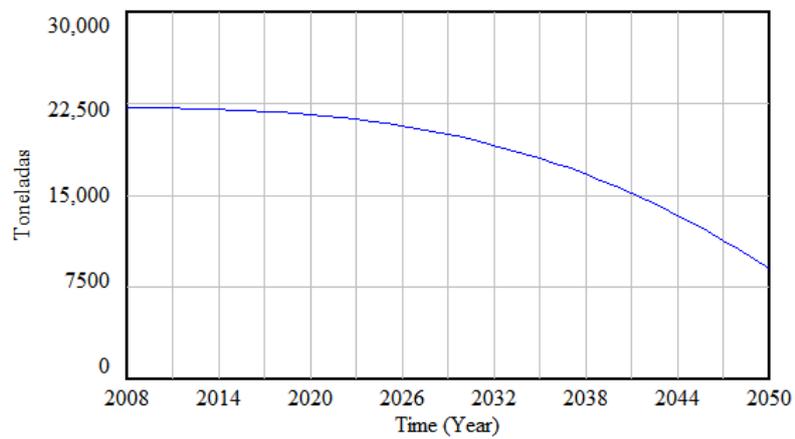
Reservas Conocidas As Anuales 0 1



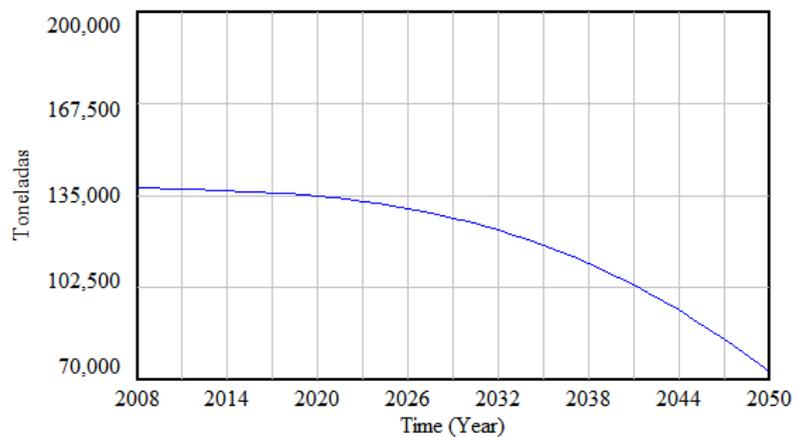
Reservas Conocidas Ga Anuales 0 1



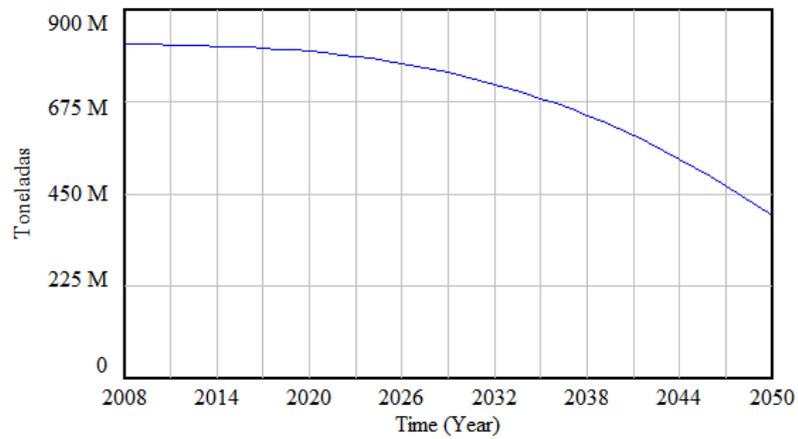
Reservas Conocidas In Anuales 0 1



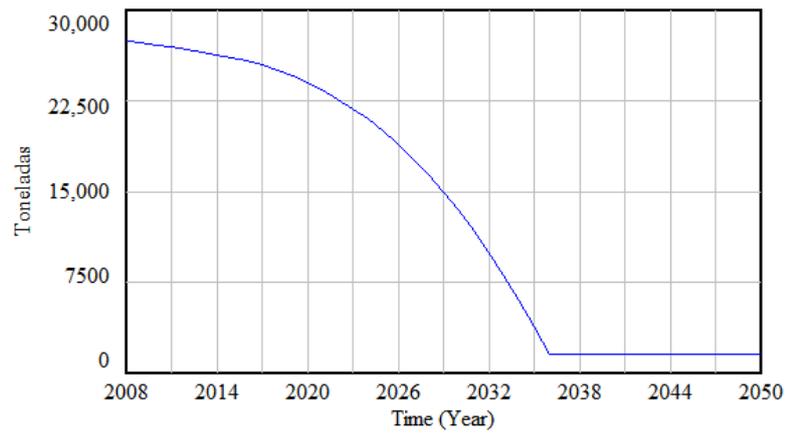
Reservas Conocidas Se Anuales 0 1



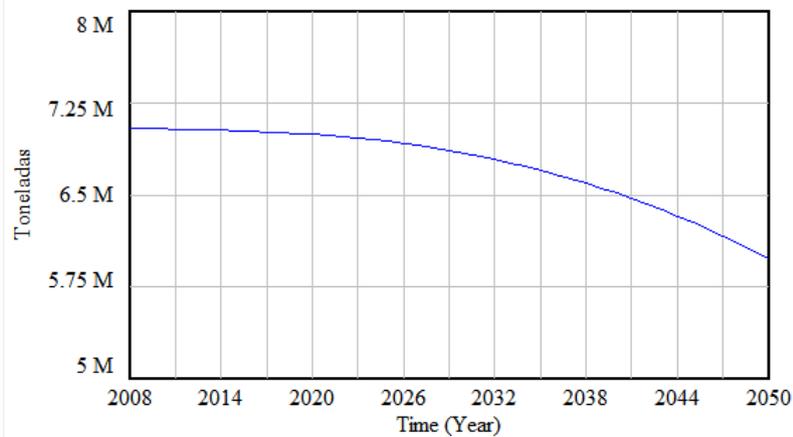
Reservas Conocidas Cu Anuales 0 1



Reservas Conocidas Te Anuales 0 1



Reservas Conocidas Cd Anuales 0 1





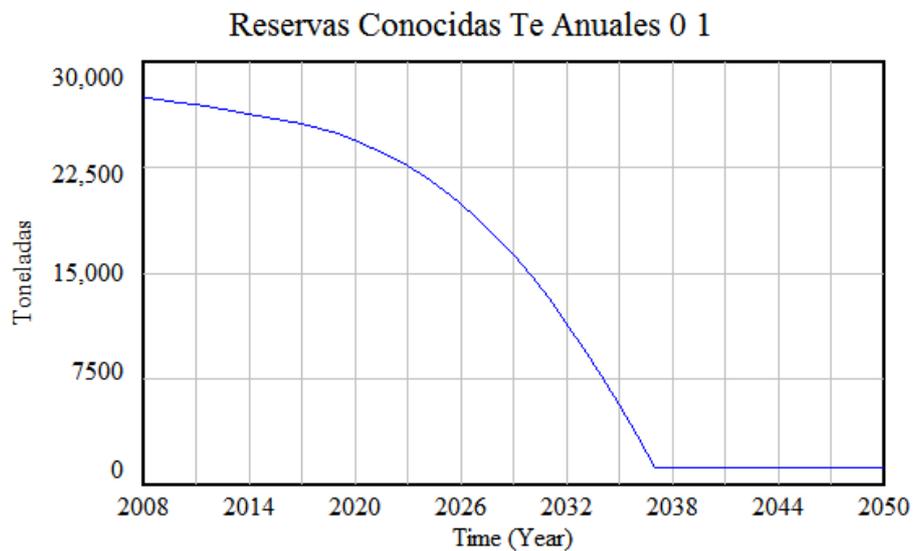
Como se puede apreciar, a pesar de que en este escenario se requería un gran despliegue de materiales mayor que en el de 1 TW, ninguno de los materiales llega a agotarse (debido a que al ser paneles de lámina delgada utilizan poco material, excepto los de silicio que usan más pero también existen muchas más reservas de este material, casi ilimitadas), solamente el telurio se acaba (es el material que menos reservas conocidas tenía) por lo que las células de TeCd se ven limitadas por el telurio, puede que dentro de unos años no se puedan fabricar a no ser que se recicle mucho más, mientras que los demás tipos de células parece que no tendrán problemas en cuanto a material se refiere, aunque no quiere decir que no tengan obstáculos como se expuso, costes, gobiernos, primas, al igual que en el otro escenario.



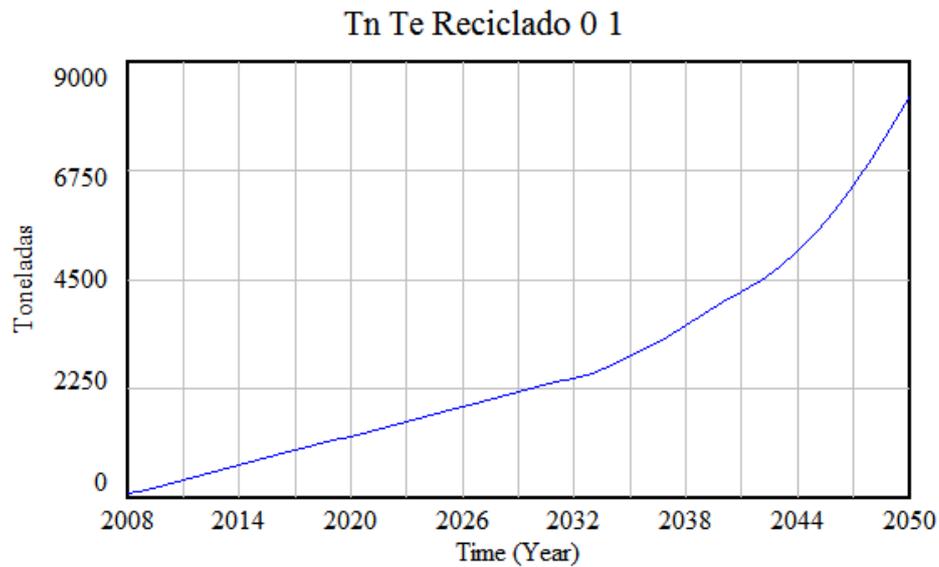
11. PROPUESTAS Y POLÍTICAS A DESARROLLAR

Mediante los datos de los posibles escenarios futuros, se puede prever lo que pasará en años sucesivos pues para ello sirve la dinámica de sistemas, como ayuda a la toma de decisiones.

Puesto que en ambos escenarios el teluro se agota, una política a llevar a cabo a corto, medio y largo plazo, sería aumentar cuanto antes (en el año 2008) el reciclaje un 20 % más. Con estas cifras se tienen los siguientes gráficos de reservas de material para el escenario de 4 TW:



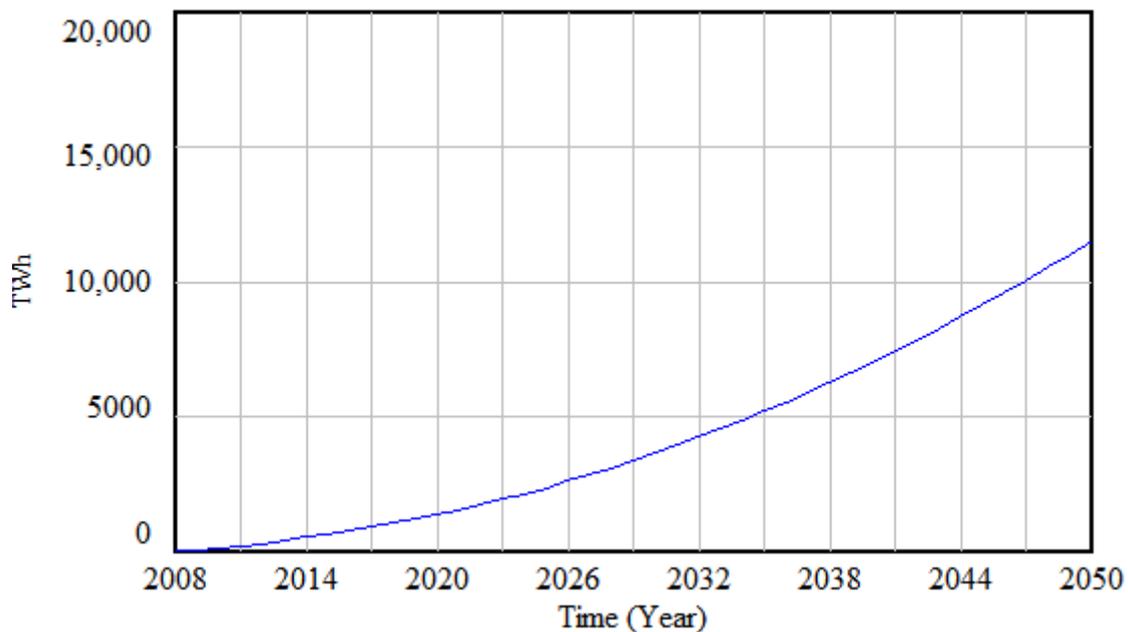
Se puede ver que aunque se reciclara algo más desde los primeros años, no es suficiente para que el teluro no se agote pues se siguen necesitando grandes cantidades de material y de material reciclado. Lo mismo ocurre con los demás materiales, pues no varían mucho sus datos.



Reciclaje Acumulado del Teluro

Además, en los escenarios se ha supuesto que la tecnología y eficiencia de las células serán en un futuro las mismas que las de ahora, cuando esto no es cierto del todo, cada día se están investigando todos los tipos de paneles fotovoltaicos para poder aumentar la eficiencia y disminuir la cantidad de material utilizado, así como los costes. Por todo esto, otra política a llevar a cabo podría ser aumentar cada vez más la eficiencia de cada célula, lo que implicaría que la relación entre potencia instalada acumulada y la energía producida de $1/5$ o $1/5.5$ sería más favorable, sobre un $1/3$, lo que permitiría llegar mucho antes a los límites establecidos de cada escenario 2000 TW producidos (escenario pesimista) y 6000 TW producidos (escenario optimista), y no sólo llegar, con estos avances y ese ritmo de crecida de instalación se pasarían y el porcentaje de electricidad cubierta debido a la energía solar fotovoltaica en el año 2050 sería mucho mayor que el 15 % del escenario optimista. Este cambio sobre el escenario de 4 TW implica:

Energía Producida Total de todas las células



Que con una mayor eficiencia en las celdas solares fotovoltaicas, se llega a los casi 12000 TW, el doble de la energía generada en el escenario optimista.

Aunque para que todo esto pudiera hacerse realidad, se necesitaría una gran apuesta por este tipo de energía solar fotovoltaica, por parte de todos y por parte de los gobiernos un aumento de la investigación e innovación, una bajada de las tarifas eléctricas y que siquiera habiendo primas y subvenciones o por lo menos que si las dejaran de dar, el sector fotovoltaico se pudiera mantener solo, siendo competitivo algo en lo que se está trabajando ya.

Otra política propuesta podría ser investigar más los yacimientos de materiales, para poder conseguir más reservas de material económicamente. Así como investigar nuevas células FV y otros materiales nuevos que irán saliendo (sustitutos) que sean más baratos, haya más reservas y obtengan una alta eficiencia energética en las células, como por ejemplo el grafeno (aunque debido a su reciente aparición actualmente es muy caro).

Por parte del proceso de fabricación del silicio (y en general de la mayoría de materiales de la fotovoltaica), se debería trabajar más en optimizar los costes de producción, pues hoy en día cuesta mucho producir silicio de grado solar.



12. CONCLUSIÓN

En los últimos años, el mundo se encuentra en progresivo deterioro en general y de la atmósfera en particular, lo que ha hecho saltar las alarmas al utilizar tanta energía contaminante recurriendo a energías poco limpias como es el caso del petróleo. Este es de carácter agotable, es decir, las reservas se están acabando poco a poco y hay que encontrar alternativas a su uso.

Algunas de esas alternativas son las energías renovables puesto que proporcionan energía y reducen las emisiones de gases efecto invernadero, lo que reduciría a su vez el calentamiento global, objetivos fijados por la EU y en el mundo.

En este proyecto se ha abordado la energía solar fotovoltaica, una de las energías renovables porque se estima que será junto con la energía eólica, la que más futuro tenga debido a que su fuente es ilimitada (el Sol). Así, se han estudiado los paneles solares pero centrándose en los materiales que tienen en su mayoría los módulos solares (no en el marco, cableado o baterías). Las células escogidas han sido las de silicio, GaAs, TeCd y CIG por ser actualmente las más comunes, las demás se encuentran en investigación.

Sin embargo, Las células solares tienen que superar sus barreras y ser desplegadas en una escala de decenas de teravatios pico para hacer un impacto notable en nuestro mix energético futuro.

Casi todas las tecnologías de células solares actuales tienen limitaciones de recursos pues el agotamiento de material se ha visto disparado en las últimas décadas. Aunque al principio de este proyecto se pensaba que habría más limitaciones en la cantidad de reservas, ha sorprendido que solo se agote el teluro de los materiales estudiados. Esto se debe a que al ser células de capa fina, se utilizan cantidades pequeñas de material en comparación con otras industrias. Por lo que las células que más sufrirán en un futuro por su limitación son las de Teluro de Cadmio, la mayor competidora de las células de silicio, junto con las CIGS, pues las de GaAs son las menos utilizadas, sólo para defensa y aeroespacial.

Aun así, aunque sólo se agotara el Teluro, la situación de los materiales y la industria fotovoltaica se podría mejorar, se pueden buscar otras alternativas de innovación en células solares respecto a eficiencia y cantidad de material, y junto con ello la mejora de costes, que actualmente son caros. Además de que se debería reciclar mucho más de lo que se hace ahora.

Respecto a los costes de producción, decir que, las células solares de silicio son las más utilizadas, sin embargo, también tienen una limitación (aunque sus reservas sean grandes), la energía requerida para fabricarlas es enorme. Con la actual

tecnología es muy caro, por lo que habría que hacer procesos de fabricación mucho más eficientes en energía.

Como conclusión del análisis de sistemas realizado, se desprende que, sobre el mix energético mundial hasta el año 2050, se espera que la energía solar fotovoltaica sea capaz de llegar a los 28 TW de potencia instalada acumulada, y con ello se logren cubrir entre 1 TW - 4 TW, lo que equivaldría al 5 % (escenario pesimista) - 15 % (escenario optimista) de la necesidad eléctrica, generándose entre 2000 TWh y 6000 TWh.

Utilizando la dinámica de sistemas se han realizado esos escenarios, junto con el escenario base o medio y de ello se ha concluido que, para ese despliegue es necesario que la cantidad de material utilizada en la industria fotovoltaica sea muy grande, ya sea extrayendo material de las minas o reciclando. Lo óptimo sería que cada vez se reciclara más (aun disminuyendo la calidad de los materiales producidos), pero se ha visto en el modelo que para superar la cantidad extraída, se tendrían que reciclar enormes cantidades de material desde el principio de la simulación (año 2008) para poder disminuir la extracción. Por ello los dos costes, de extracción y reciclaje son grandes, aunque cuando entra en juego el reciclaje se puede ver una ligera disminución de los costes de extracción y producción. Lo cual se nota a la hora de que disminuyan las reservas de cada material.

Estas reservas, como se ha comentado, en ninguno de los materiales estudiados se agotan, ya sea el silicio (células de silicio cristalino, policristalino y amorfo), en GaAs (Arsénico y Galio), en CIGS (Cobre,Indio,Galio,Selenio), excepto en las células de TeCd (Teluro,Cadmio), las cuales no van a tener un futuro más allá del año 2038 pues el telurio, al agotarse, limita este tipo de paneles solares. Y, aunque se reciclara cada vez más, sus reservas son tan limitadas que se seguiría agotando en los próximos años del estudio. Esto ocurre en los dos escenarios, cabe pensar que en el escenario optimista se agotaran más materiales por la tendencia tal alta de instalación, pero se ha podido ver que tanto en ese como en el pesimista que utiliza menos material y por tanto se instalan menos paneles, la mayoría no se acaban, esto se debe a que el escenario pesimista aunque parezca pequeño 1 TW de potencia instalada, es una cifra enorme comparada con la que tenemos ahora, aproximadamente 0,02 TW, por ello los resultados son similares a los de 4 TW.

Visto esto, si en un futuro la mayoría de materiales no se van a agotar, como conclusión particular puedo decir que lo aconsejable sería ponerse a trabajar en mejorar la industria, mejorando la investigación en células solares para aumentar su eficiencia, costes y necesitar menos material o descubrir otros nuevos como sustitutos (o más reservas de los utilizados) para que así la industria pueda ser competitiva y no tenga que necesitar subvenciones.

Respecto a expectativas mundiales, todo apunta a que la demanda de energía solar a gran escala se acelerará en Estados Unidos y, en particular, en los mercados emergentes debido a una combinación de políticas de apoyo (sin subvenciones o cada vez más reducidas) y al descenso de costes de la electricidad fotovoltaica. Se puede ser especialmente optimista sobre las perspectivas de crecimiento en India, Oriente Medio, África del Sur y América del Sur (en especial México, Chile y Brasil), sin olvidar China.

Para el año 2050 se espera que la tasa mundial de penetración de la energía solar se incremente de forma exponencial, y de manera más rápida en las economías en desarrollo. En algunos de estos países (América Central y América del Sur), la solar fotovoltaica ya está en paridad de red en el mercado mayorista (los costes de generación son similares a los de otras energías), y en las zonas donde no llega la red, la opción solar parecer ser la más obvia. Su despliegue es sencillo y barato.

13. VIABILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO

El desglose de los recursos que se necesitaron para realizar el proyecto fueron los siguientes:

Materiales (ordenador, mesa, utensilios)	1.100 euros
Mano de Obra (Ingeniero en Org. Industrial)	12 euros/hora trabajada
Tiempo Total horas trabajadas	7 meses x 30 días/mes x 5 horas/día trabajadas = 1.050 horas
Costes Totales Proyecto	13.700 euros



14. BIBLIOGRAFÍA:

- [1] ECOINTELIGENCIA - Las energías renovables tienen mucha historia - día 13 febrero, 2015 sobre ENERGIA -
<http://www.ecointeligencia.com/2015/02/energias-renovables-historia/>
- [2] ENERGÍAS ALTERNATIVAS – ENERGÍA SOLAR –
http://www.natureduca.com/energ_alterna_genereolic1.php
- [3] El periódico de la energía.com – “Los costes de la fotovoltaica caen un 80% en los últimos cinco años” -
<http://elperiodicodelaenergia.com/los-costes-de-la-fotovoltaica-caen-un-80-en-los-ultimos-cinco-anos/>
- [4] Panel Solar Fotovoltaico - Radiación Solar, Irradiancia e Insolación
<http://eliseosebastian.tumblr.com/post/53530683135/radiaci%C3%B3n-solar-irradiancia-e-insolaci%C3%B3n>
- [5] Ingeniería en la Red – Optimización de la orientación de los paneles solares
<https://ingenieriaenlared.wordpress.com/2014/12/03/optimizacion-de-la-orientacion-de-los-paneles-solares/>
- [6] Energía Fotovoltaica de concentración, más eficiente y económica -
<http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2007/05/07/65124>
- [7] CBG PARQUES FOTOVOLTAICOS – Energías renovables, paneles solares, techos y parques fotovoltaicos –
http://www.parquesfotovoltaicos.com/rentabilidad_energia_solar_fotovoltaica.php
- [8] El Mundo - Energía solar más barata y segura -
<http://www.elmundo.es/ciencia/2014/06/25/53ab0389ca474115308b458c.html>
- [9] NREL – NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY -
<http://www.nrel.gov/>
- [10] DINÁMICA DE SISTEMAS por Javier Aracil – ISDEFE Ingeniería de Sistemas -

http://www.simposio.palmira.unal.edu.co/documentos/Dinamica_Aracil.pdf

- [11] Dinámica de Sistemas - <http://www.dinamica-de-sistemas.com>
- [12] Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas – Universidad de Valladolid - ¿Qué es la dinámica de sistemas? - <http://www.eis.uva.es/energiasostenible/>
- [13] Libro “DINAMICA DE SISTEMAS – EJERCICIOS” - Juan Martín García - Capítulos 1 y 2
- [14] Transparencias Asignatura “Dinámica de Sistemas Complejos” – Luis Javier Miguel González – Profesor de la Universidad de Valladolid
- [15] PDF - ESTUDIO DE BENCHMARKING TECNOLÓGICO INTERNACIONAL – Sector *Energía Solar Fotovoltaica* - José Ángel García Mera
- [16] Proyecto “Características térmicas y eléctricas de un panel solar fotovoltaico-térmico” - Autor: Félix Checa Cabrero - Universidad Carlos III de Madrid - Escuela Politécnica Superior- Cap. 1 y 2
- [17] Tesis “Diseño, elaboración, caracterización y ensayos de dispositivos fotovoltaicos para usos espaciales”- Autor: Lic. Mónica G. Martínez Bogado – Año 2004 - Universidad Nacional San Martín Comisión Nacional de Energía Atómica Instituto de Tecnología – Cap. 1 y 2
- [18] Proyecto “Obtención Experimental de Parámetros Característicos de Diversas Tecnologías de Módulos Fotovoltaicos” - Autor: Angelina Romero Valderrama - Universidad Carlos III de Madrid
- [19] Proyecto “Análisis del Comportamiento Temporal de los Parámetros Característicos de Módulos Fotovoltaicos de Tres Tecnologías Diferentes” – Autor: David Menéndez Díaz - Universidad Carlos III de Madrid - Escuela Politécnica Superior - Año 2011 – Cap. 1-4
- [20] Portal de Energías Renovables – SITIOSOLAR - <http://www.sitiosolar.com/>
- [21] CIFES – Ministerio de Energía – Gobierno de Chile – Pdf’s “Cartas Solar” y “Libro Solar” - CER Centro de Eenergías Renovables - <http://cifes.gob.cl/tecnologias/solar/fotovoltaica-pv/>

- [22] Proyecto “Diseño de una instalación fotovoltaica de venta a red con monitorización de energía” – Autor: Rubén Crego Villarroel – Universidad Politécnica de Cataluña - Año 2013 – Cap. 2
- [23] SIMEC CHILE SRL -
https://www.unglobalcompact.org/system/attachments/8146/original/Proyecto_Simec_Chile.pdf?1287789602
- [24] Econotecnia – Paneles Solares – Ventajas -
<http://www.econotecnia.com/paneles-solares.html>
- [25] Libro PDF “Energías renovables y eficiencia energética” – Capítulo 4. Energía solar fotovoltaica - Instituto Tecnológico de Canarias – Año 2008
- [26] Tesis Doctoral “Energía solar fotovoltaica, competitividad y evaluación económica, comparativa y modelos” – Autor: Eduardo Collado Fernández - Ingeniero Industrial (Electricidad) - Universidad Nacional de Educación a Distancia – Año 2009
- [27] INFORME DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA – “Tendencias tecnológicas mundiales en el desarrollo y aplicación de paneles solares fotovoltaicos” - Elaborado por: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) e IALE Tecnología, S.L. - Mayo, 2009
- [28] “2013 Renewable Energy Data Book” - Energy Efficiency & Renewable Energy – U.S. Department of Energy
- [29] Solar Added Value - Concentración Fotovoltaica CPV -
<http://solaraddedvalue.com/es/category/tecnologias/concentracion-fotovoltaica-cpv/>
- [30] “Todo sobre paneles fotovoltaicos” – Qué es y cómo funciona un panel fotovoltaico, la energía verde y eficiente -
<http://paneles-fotovoltaicos.blogspot.com/>
- [31] PDF “*Historia de la energía solar fotovoltaica*” – ASIF - Septiembre 2008
- [32] Libro PDF “GLOBAL MARKET OUTLOOK” – for photovoltaics until 2016 – EPIA (European Photovoltaic Industry Association) – Año 2012

- [33] Microelectrónica y semiconductores-Director del capítulo Michael E. William-
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/83.pdf>
- [34] ISE “Instituto de metales de tierras raras y e.V.” -
<http://institut-seltene-erden.org/es/indium-in-ordnungszaahl-49/>
- [35] Empresa Lenntech -
<http://www.lenntech.es/periodica/tabla-periodica.htm>
- [36] *EE.UU. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Enero el año 2015* - <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2015/mcs2015.pdf>
- [37] Ecologistas en Acción - “La demanda de paneles solares fotovoltaicos supera a la oferta” -
http://www.ecologistasenaccion.org/article.php3?id_article=1452
- [38] ABC Tecnología - “Crece la demanda de obleas de silicio monocristalino de calidad solar” -
<http://www.abc.es/tecnologia/20150513/abci-silicio-monocristalino-solar-201505131911.html>)
- [39] El sol calienta el silicio - Txt: Antonio Alonso -
<http://www.mecalux.com/external/magazine/40926.pdf>
- [40] TXAKARTEGI *Servicios Electrotécnicos* - <http://www.txakartegisl-electricista-instalaciones-electricas-bilbao.com/la-energia-verde-un-poco-mas-verde/>
- [41] Energías Renovadas El Motor del Nuevo Mundo – El reciclaje de Placas Solares - David Sanz - <http://energiasrenovadas.com/el-reciclaje-de-placas-solares/>
- [42] HTWT – PDF “Situación de la Gestión de Paneles Fotovoltaicos” – Año 2012 -
file:///C:/Users/Administrador/Downloads/a13.2%20d2.2%20ecotic%20_

situacin%20de%20la%20gestin%20de%20paneles%20fotovoltaicos%20(1)
.pdf

- [43] PDF – Planta Solar Fotovoltaica -Fátima Casas Villar del Saz, Eva López Álvarez, Silvia Marzal Cebrian
- [44] UNEF (Unión Española Fotovoltaica) – Informe anual 2014 – La energía fotovoltaica conquista el mercado -
<http://unef.es/2014/11/informe-anual-2014-la-energia-fotovoltaica-conquista-el-mercado/>
- [45] Empresa Lenntech –Elemento Galio -
<http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ga.htm>
- [46] ISE “Instituto de metales de tierras raras y e.V.” – Elemento Galio -
<http://institut-seltene-erden.org/es/ga-de-galio-n%C3%BAmero-at%C3%B3mico-31/>
- [47] TRADIUM – Los Expertos Invierten en el Futuro – Metales Especiales y Tierras Raras - <http://www.agroba.org/downloads/xestec-11/pdf1-230.pdf>
- [48] → PDF – Artículo Científico – “An assessment of metal supply sustainability as an input to policy: security of supply extraction rates, stocks-in-use, recycling, and risk of scarcity” – Autores: Harald U. Sverdrup, Kristin Vala Ragnarsdottir, Deniz Koca – Año 2014
- [49] Realidad Minera – “¿Qué papel juega el arsénico en la industria minera?” - <http://www.miningfacts.org/Ambiente/Que-papel-juega-el-arsenico-en-la-industria-minera/>
- [50] Energía Renovable FOCUS.COM – Reciclaje de Paneles Solares FV -
<http://www.renewableenergyfocus.com/view/3005/end-of-life-pv-then-what-recycling-solar-pv-panels/>
- [51] HANDBOOK OF RECYCLING – Ernst Worrell and Markus A. Reuter – Año 2014 – Tema 10 -
https://books.google.es/books?id=gQfUAgAAQBAJ&pg=PA139&lpg=PA139&dq=500e550+t/+a%C3%B1o+en+2011&source=bl&ots=mn1LPT1rBx&sig=nuKnj2kumiN4yr_9oh6SepipV3U&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwidpevGI5bM

AhWLORoKHXOTCOEQ6AEIHzAA#v=onepage&q=500e550%20t%20%2F%20a%C3%B1o%20en%202011&f=false

- [52] ETSEIB – “Estudio del estado del arte y perspectivas de los metales críticos” -
<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/77554/PFC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [53] PWC – “7 Razones para implementar eficiencia energética en la minería” – http://www.pwc.com/cl/es/prensa/columnas-de-opinion/7_razones_eficiencia_energetica0.html
- [54] Teoría del Pico de Hubbert (el fin del petróleo) -
<http://www.neoteo.com/teoria-del-pico-de-hubbert-el-fin-del-petroleo>
- [55] ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA CORTEZA CONTINENTAL - Agüera Àngel, Cristina -
https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2014/126048/TFG_CristinaAgueraAngel.pdf
- [56] La demanda mundial de fotovoltaica crece un 34% en 2015 – El periódico de la energía.com - <http://elperiodicodelaenergia.com/la-demanda-mundial-de-fotovoltaica-crece-un-34-en-2015/>
- [57] La batalla entre el petróleo barato y las renovables definirá el futuro de la energía – El periódico de la energía.com -
<http://elperiodicodelaenergia.com/la-batalla-entre-el-petroleo-barato-y-las-renovables-definira-el-futuro-de-la-energia/>
- [58] Energía Solar Fotovoltaica: una Visión - José Herrero Rueda Herrero Rueda -Departamento de Energías Renovables (CIEMAT) -
[http://www.industria.ccoo.es/comunes/recursos/99927/529043-Centro_de_Investigaciones_Energeticas,_Medioambientales_y_Tecnologicas_\(CIEMAT\).pdf](http://www.industria.ccoo.es/comunes/recursos/99927/529043-Centro_de_Investigaciones_Energeticas,_Medioambientales_y_Tecnologicas_(CIEMAT).pdf)
- [59] Empresa fotovoltaic - Financiación de las instalaciones fotovoltaicas -
http://fotovoltaic.com/financiacion_de_las_instalaciones_fotovoltaicas.htm
- [60] Financiación de energías renovables – Banco Santander -

http://www.santander.com/csgs/Satellite/CFWCSancomQP01/es_ES/Corporativo/Sostenibilidad/Santander-y-la-sostenibilidad/Financiacion-energias-renovables.html

- [61] 5 claves para entender la problemática sobre las primas a las renovables – Carlos de Rodrigo -
<http://blogs.hoy.es/eneltintero/2014/06/10/cinco-claves-para-entender-la-problematika-sobre-las-primas-a-las-renovables/>
- [62] El futuro de la energía fotovoltaica – ECO00 -
<http://blog.eco00.es/?p=47>
- [63] La oportunidad de la energía solar - CINCO DIAS -
http://cincodias.com/cincodias/2015/06/02/empresas/1433270756_956922.html
- [64] ESCENARIOS – PDF GREENPEACE, Energía 3.0 – Un sistema energético basado en inteligencia, eficiencia y renovables 100 % - Septiembre 2011
- [65] Fuente: IEA (International Energy Agency) – 2015 Snapshot of Global Photovoltaic Markets –
http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2015_-_Final.pdf
- [66] ¿Cuáles son los mercados fotovoltaicos del futuro? – El periódico de la energía.com – Por José A. Roca – Año 2015 -
<http://elperiodicodelaenergia.com/cuales-son-los-mercados-fotovoltaicos-del-futuro/>
- [67] Potencial de la energía solar fotovoltaica – RECOPE (Seguridad energética) - Autor: Ludwing Guillén García – Año 2014 -
<https://www.recope.go.cr/potencial-de-la-energia-solar-fotovoltaica/>
- [68] El hoy y el mañana de la fotovoltaica – Energías Renovables (el periodismo de las energías limpias) – Año 2015 - <http://www.energias-renovables.com/articulo/el-hoy-y-el-manana-de-la-20150304>
- [69] Objetivos de la UE. Unión Europea – PDF Energía -
http://europa.eu/pol/ener/index_es.htm

- [70] Menos del 3% de la electricidad que consumen las islas Baleares es de origen renovable- Energías Renovables (el periodismo de las energías limpias) –Año 2016 - <http://www.energias-renovables.com/articulo/menos-del-3-de-la-electricidad-que-20160212>
- [71] “El sol calienta el silicio” – MECALUX – Año 2014 - <https://www.mecalux.es/articulos-de-logistica/sol-calienta-silicio>
- [72] El Tamiz – “Conoce tus elementos – El Galio” – Año 2013 - [<http://eltamiz.com/2012/12/13/conoce-tus-elementos-el-galio/>]
- [73] MTL INDEX – “El Indio: Tierras Raras” Año 2015 – <http://mtlindex.es/tierras-raras-indio/>
- [74] ”Escenarios Futuros” - <http://www.reddetransicion.org/wp-content/uploads/2014/02/Escenarios-Futuros-Holmgren-Espanol.pdf>
- [75] “La Oportunidad de la energía solar” – CINCO DÍAS – Año 2015 - http://cincodias.com/cincodias/2015/06/02/empresas/1433270756_956922.html
- [76] Artículo científico:“Natural resource limitations to terawatt-scale solar cells 28 TW” – Autores: Coby S.Tao, JiechaoJiang, MengTao – Año 2010
- [77] “Las 10 mayores plantas fotovoltaicas del mundo” – E periódico de la energía.com – Año 2016 - <http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/>
- [78] Convert Units - <https://www.unitjuggler.com/energy-convertir-MWh-a-toe.html>
- [79] USGS - Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells - By Donald I. Bleiwas –Año 2010

- [80] JRC Scientific and Technical Reports - Critical Metals in Strategic Energy Technologies - Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies – Autor: R.L.Moss¹, E.Tzimas¹, H.Karaz, P.Willis² and J.Kooroshy³ – Año 2011
- [81] PDF - “El impacto de las energías renovables en la economía con el horizonte 2030” – Greenpeace - Octubre 2014
- [82] “La energía fotovoltaica, una alternativa real” - UNEF – Informe anual 2015 - CAP. evolución de costes de las instalaciones fotovoltaicas
- [83] “La energía fotovoltaica, conquista el mercado” - UNEF – Informe anual 2014
- [84] “Systematic Photovoltaic Waste Recycling” - Wolfram Palitzsch* and Ulrich Loser – ScienceDirect – Año 2013
- [85] “Historia de la energía solar fotovoltaica” – ASIF – Año 2008
- [86] “Módulos Fotovoltaicos” - SolElectric, S.A.
- [87] “2013 Renewable Energy Data Book” – U.S. Department of energy - Produced by Sean Esterly and Rachel Gelman – Año 2013
- [88] “Global_Market_Outlook for Photovoltaics until 2016” – EPIA (European Photovoltaics Industry Association)– Mayo 2012
- [89] “Technology Roadmap” - Solar photovoltaic energy – IEA (International Energy Agency)
- [90] “Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells” – December 2009

15. Fuente Imágenes:

- [1] Tipos de Energías Renovables y No Renovables. Fuente: Página <http://www.eoi.es>
- [2] Molino Eólico y Partes de un Generador. Fuente: Página <https://smienergias.wordpress.com/tag/aerogenerador/>
- [3] Central hidroeléctrica. Fuente: Pág. <http://www.goodenergy.cl>
- [4] Central hidroeléctrica .Fuente: Página <http://www.iagua.es>
- [5] Biomasa. Fuente: Página <http://biomasaentucasa.com>
- [6] Sistema OTEC. Fuente: <http://www.wikienergia.pt>
- [7] Energía Maremotriz. Fuente: Página <http://tecnologiapiirineos.blogspot.com>
- [8] Figura Géiseres. Fuente: Pág. <http://www.epicentrosur.cl>
- [9] Central geotérmica. Fuente: Pág. <http://lasenergiasrenovables.weebly.com>
- [10] Olas de Mar. Fuente: Página <http://www.energiverde.com>
- [11] Paneles fotovoltaicos. Fuente: Pág. <http://www.energiamoderna.com.ar>
- [12] Principales países con electricidad renovable instalada de Tecnología (2013) Fuente: 2013 Renewable Energy Data Book
- [13] IRENA (2014C). Fuente: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_NAMAs_handbook_2014_SP.pdf
- [14] Sistemas Fotovoltaicos. SOLARGY. <http://www.gruposolargy.com/>
- [15] Sistema fotovoltaico. Fuente: <https://www.ujaen.es/investiga/solar>
- [16] Curva característica. Fuente: Página <http://www.monografias.com>
- [17] Sistema fotovoltaico. Fuente: <https://www.ujaen.es/investiga/solar>
- [18] Panel de formato teja, Fuente: SitioSolar.com
- [19] Fuente: Solsticios y Equinoccios. Pág. <http://www.atril.org>
- [20] Fuente: Tesis – Francisco Adrián Loaeza Salcedo
- [21] Fuente: Proyecto técnico de Sergi Español Fernández
- [22] Fuente: ELISEO SEBASTIÁN
- [23] Conductores y otros. Fuente: <http://electronicacecyt3.blogspot.com>
- [24] Fuente: Pág. <http://celdasfotovoltaicas.blogspot.com.es>
- [25] Fuente: Trabajo de Investigación de Benjamín Mery
- [26] Proceso de fabricación de un módulo de silicio. Fuente: <https://www.ujaen.es/investiga/solar>
- [27] Fuente: Enerwork – Energía solar, equipo, consultoría y aplicaciones
- [28] Fuente: Indarland – Renewable Energy
- [29] Fuente: Pág. Electricidad gratuita – Construcción y fabricación

- [30] Fuente: <http://www.tiendafotovoltaica.es>
- [31] Fuente: Tecnología CIGS para nuevas células solares - <http://www.energias-renovables.com>
- [32] Fuente: <http://www.esco-tel.com>
- [33] Fuente: Página <http://www.diariodeciencias.com.ar>
- [34] Fuente: SPIE
- [35] Fuente: Página <http://deltavolt.pe/energia-renovable>
- [36] Fuente: Ecoinventos – Green Technology - Pág. <http://ecoinventos.com>
- [37] Fuente: Página <http://www.efimarket.com>
- [38] Fuente: GMD Solutions – Pág. <http://www.gmdsol.com>
- [39] Fuente: Pág. Mundo solar - <http://www.dforcesolar.com>

- [40] Fuente: <http://blog.nutonian.com/topic/tutorial> - Autor: Michael Schmidt
- [41] Fuente: Business Dynamics, de J.D.Sterman
- [42] Fuente: Imagen elaborada por Gail Tverbeg en su publicación “World Energy Consumption Since 1820” basada en los datos aportados en la obra Energy Transitions: History, Requirements and Prospects de Vaclav Smil y datos aportados por BP.
- [43] Curva de Hubbert del ciclo de producción de cualquier recurso no renovable.
- Fuente: Proyecto de Alicia Valero “El agotamiento de los recursos naturales no energéticos en las transiciones hacia la sostenibilidad”
- [44] Fuente: Pág. <http://www.industria.ccoo.es/comunes/recursos> - CIEMAT
- [45] Fuente: Pág. <http://www.industria.ccoo.es/comunes/recursos> - CIEMAT
- [46] Fuente: UNEF – “La energía fotovoltaica una alternativa real”
- [47] Evolución de la potencia fotovoltaica instalada (anual) en todo el mundo.
- Fuente: SPE

- [48] Fuente: IEA (International Energy Agency) – 2015 Snapshot of Global Photovoltaic Markets
- [49] Evolución de la potencia fotovoltaica instalada (acumulada) en todo el mundo. Fuente: IEA
- [50] Fuente: E.R. El periodismo de las energías limpias

- [51] Fuente: Página <http://solar-energia.net/definiciones/silicio.html> - silicio
- [52] Fuente: Página <http://Miliarium.com> – Arsénico Natural



- [53] Fuente: Página <http://eltamiz.com/> - Elementos – Galio
- [54] Fuente: Página <http://www.tabelaperiodicacompleta.com/> - Indio
- [55] Fuente: Página <http://elementos.org.es/elementos-solidos> - Elementos
- [56] Fuente: Pág. <http://laeco.net/cobre.htm> - “El cobre, antídoto contra el dolor”- Xavier Armengol
- [57] Fuente: Página “ProyectoFSE”
- [58] Ejemplo del reciclado de MODULO TeCd en FIRSTSOLAR. Fuente: Web Empresa First Solar
- [59] Fuente: Página “Seguridad y salud en el trabajo”
- [60] Fuente: <http://upcommons.upc.edu>
- [61] Fuente: H.U. Sverdrup et al. / Journal of Cleaner production xxx (2015) 1-14

16. ANEXOS

16.1. Porcentajes de material en módulos FV

Mediante las cantidades totales de material en toneladas del año 2008 que se extrajeron, se obtienen por proporciones los porcentajes que proporciona cada material en los módulos FV, se calculan de la siguiente forma:

Porcentajes de material en células GaAs:

AÑO 2008	
Cantidad de material Ga utilizado	23,28 Toneladas
Cantidad de material As utilizado	2635 Toneladas
Total material	2658,3 Toneladas

2658,3 Toneladas	100%	
23,28 Toneladas	X = 0,86 %	X= 0'0086 Ga

1 - 0'0086 = 0,9982		X= 0'9914 As
---------------------	--	--------------

Porcentajes de material en células TeCd:

AÑO 2008	
Cantidad de material Te utilizado	140 Toneladas
Cantidad de material Cd utilizado	2940 Toneladas
Total material	3080 Toneladas

3080 Toneladas	100%	
140 Toneladas	X = 4,55 %	X= 0'045 Te

1 - 0,045 = 0,955		X= 0'955 Cd
-------------------	--	-------------

Células GaAs --> 1 % de paneles mundiales

Células CIGS --> 3 % de paneles mundiales

Suman 4 partes de las cuales 1/4 es cantidad de Galio destinado a paneles de GaAs y 3/4 partes es destinado a células CIGS, respectivamente 0,25 % y 0,75 %.

Como la cantidad total de material GA utilizado (GaAs + CIGS) en el año 2008 fue de 93.1 toneladas

Se tiene que para Ga de GaAs = $95 \times 1/4 = 23,28$ toneladas

Se tiene que para Ga de CIGS = $95 \times 3/4 = 69,82$ toneladas

Porcentajes de material en células CIGS:

AÑO 2008		
Cantidad de material GA utilizado	69,82 Toneladas	
Cantidad de material In utilizado	28,5 Toneladas	
Cantidad de material Se utilizado	105,7 Toneladas	
Cantidad de material Cu utilizado	1078000 Toneladas	
Total material	1078204,02 Toneladas	
1078204,02 Toneladas	100%	
69,82 Toneladas	X = 0'0065 %	X= 0'000065 Ga
1078204,02 Toneladas	100%	
28,5 Toneladas	X = 0'0026 %	X= 0'000026 In
1078204,02 Toneladas	100%	
1078000 Toneladas	X = 99'96 %	X= 0'9996 Cu
1 - (0'0000065 + 0'000026 + 0'9996) = 0'00037 %		X= 0'00037 Se

16.2. Costes de reciclaje de los materiales

Se tienen estos datos sobre las células FV:

	Economic cost for logistics and recycling (per tonne)	Revenues from material recycling (per tonne)	Net costs (per tonne)
For c-Si PV modules	290 €	2 105 €	-1 815 €
For a-Si PV modules	210 €	2 349 €	-2 139 €
For CdTE PV modules	269 €	2 349 €	-2 080 €
For CIGS/CIS PV modules	270 €	2 349 €	-2 079 €

Fuente [42]: HTWT - Situación de la Gestión de Paneles Fotovoltaicos

Con esos datos y utilizando los porcentajes del apartado anterior, se obtienen los costes de reciclaje proporcionales a cada material:

COSTES DE RECICLAJE DE LOS DISTINTOS MATERIALES DE CADA CÉLULA FOTOVOLTAICA		Euros por Ton de Material Reciclada
SILICIO --> 290 EUROS (c-si) + 210 EUROS (a-si)	$(290 + 210) / 2$	250
CdTe --> 269 EUROS		
	$269 * 0,955$	256,895
Cd (porcentaje = 0,955)		
Te (porcentaje = 0,045)	$269 * 0,045$	12,105
CIGS --> 270 EUROS		
Cu (porcentaje = 0,9996)	$270 * 0,9996$	269,892
In (porcentaje = 0,000026)	$270 * 0,000026$	0,00702
Ga (porcentaje = 0,000065)	$270 * 0,000065$	0,01755
Se (porcentaje = 0,00037)	$270 * 0,00037$	0,0999
GaAs (estimación propia) --> 250 EUROS		
Ga (porcentaje = 0,0086)	$250 * 0,955$	238,75
As (porcentaje = 0,9914)	$250 * 0,045$	11,25
Ga Total (células GaAs + células CIGS)	$0,01755 + 238,75$	238,76755

16.3. Variable - Porcentaje incremento de instalación en los escenarios

Potencia Instalada Acumulada	Año	Potencia Instalada Anual	Diferencia Instalado Año Anterior	Incremento Anual (%)	
70,04 GW	Año 2011	28,70 GW	-	-	Año Pesimista - 2,50 %
100,50 GW	Año 2012	30,46 GW	-1,76	-2,5	
138,87 GW	Año 2013	38,37 GW	7,91	7,87	Año Optimista 9 %
178,40 GW	Año 2014	39,53 GW	1,16	0,84	

Ejemplo: $(100 \times 1,76) / 70,04$

Año Medio 4%

De la diferencia entre el año pesimista y año optimista se obtiene un 4 % medio para el escenario base.

16.4. Gastos energéticos de extracción y producción de los materiales

eurostat

Suministro, transformación y consumo de energías renovables - datos anuales

Última actualización: 27-04-2015
Tabla de personalización [aspecto:eu](#)

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Unión Europea (28 países)	62.4	125.5	214.3	324.4	639.2	1.205.6	1.935.1	3.896.1	5.795.6	6.953.3
Zona del euro (19 países)	61.7	124.3	213.0	322.5	636.0	1.195.0	1.876.1	3.676.3	5.412.5	6.399.6
Bélgica	0.1	0.1	0.1	0.5	3.6	14.3	48.2	100.6	184.7	227.0
Bulgaria	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.3	8.7	70.0	117.0
República Checa	0.0	0.0	0.1	0.2	1.1	7.6	52.9	187.6	194.7	174.8
Dinamarca	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	1.3	8.9	44.5
Alemania (hasta 1990 antiguo)	47.9	110.3	190.9	264.4	380.0	566.1	1.008.5	1.685.2	2.268.3	2.666.3
Estonia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Irlanda	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Grecia	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	4.3	13.6	32.5	145.7	313.7
España	4.8	3.5	10.2	43.0	220.3	512.6	552.4	639.8	704.4	713.4
Francia	0.7	0.9	1.0	1.5	3.6	15.0	53.3	178.7	345.3	400.7
Croacia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Italia	2.5	2.7	3.0	3.3	16.6	58.2	163.9	328.3	1.621.8	1.856.3
Chipre	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.9	4.1
Letonia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lituania	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	3.9
Luxemburgo	0.8	1.5	1.7	1.8	1.7	1.7	1.8	2.2	3.3	6.3
Hungría	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.7	2.1
Países Bajos	2.8	2.9	3.0	3.1	3.3	3.9	5.2	8.6	21.8	44.4
Austria	1.6	1.8	1.9	2.1	2.6	4.2	7.6	15.0	29.0	50.1
Polonia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
Portugal	0.3	0.3	0.4	2.1	3.3	13.8	18.2	24.1	33.8	41.2
Rumanía	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.7
Eslovenia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	1.1	5.6	14.0	18.5
Eslovaquia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	34.1	36.5	50.6
Finlandia	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
Suecia	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.6	0.7	0.9	1.6	3.0
Reino Unido	0.3	0.7	1.2	1.5	1.7	3.5	21.0	116.1	175.0	175.0
Noruega	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Montenegro	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Antigua República Yugoslava (2002-2011)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.8

Valor especial:
 : No disponible

Datos de energía TOE obtenidos de EUROSTAT “Suministro, transformación y consumo de energía renovables (fotovoltaica)”:

GASTOS ENERGÉTICOS DEL SILICIO		2008	2009	2010	2011	2012	2013	
En 2013 fue el 9% de la producción global de módulos solares	Energía Europea en TOE	639.200	1.205.600,00	1.935.100,00	3.896.100,00	5.795.600,00	6.953.300,00	TOE
1 MWh ----- 0,086 TOE X ----- 639.200 TOE	Energía Europea en MWh	7.432.558,1	14.018.604,7	22.501.162,8	45.303.488,4	67.390.697,7	80.852.325,6	MWh
si 0,09 ---- 7.432.558,1 1----- X	Energía Mundial	82.583.979,3	155.762.273,9	250.012.919,9	503.372.093,0	748.785.529,7	898.359.173,1	MWh
Porcentaje de células de Silicio (Mono-Silicio 24%, Multi-Silicio 65% y Silicio-Amorfo 3%) = 92 %	Energía que va destinada a Si	75.977.261,0	143.301.292,0	230.011.886,3	463.102.325,6	688.882.687,3	826.490.439,3	MWh

GASTOS ENERGÉTICOS DEL TELURO Y CADMIO		2008	2009	2010	2011	2012	2013	
En 2013 fue el 9% de la producción global de módulos solares	Energía Europea en TOE	639.200	1.205.600,00	1.935.100,00	3.896.100,00	5.795.600,00	6.953.300,00	TOE
1 MWh ----- 0,086 TOE X ----- 639.200 TOE	Energía Europea en MWh	7.432.558,1	14.018.604,7	22.501.162,8	45.303.488,4	67.390.697,7	80.852.325,6	MWh
si 0,09 ---- 7.432.558,1 1----- X	Energía Mundial	82.583.979,3	155.762.273,9	250.012.919,9	503.372.093,0	748.785.529,7	898.359.173,1	MWh
% mundial de células TeCd, según quesito de 2013 es 4%	Energía que va destinada a células TeCd	3.303.359,2	6.230.491,0	10.000.516,8	20.134.883,7	29.951.421,2	35.934.366,9	MWh
células de Te 0'045 de material sobre una unidad	Energía que va destinada a Te	148.651,2	280.372,1	450.023,3	906.069,8	1.347.814,0	1.617.046,5	MWh
células de Cd 0'955 de material sobre una unidad	Energía que va destinada a Cd	3.154.708,0	5.950.118,9	9.550.493,5	19.228.814,0	28.603.607,2	34.317.320,4	MWh

GASTOS ENERGÉTICOS DEL GALIO Y ARSÉNICO		2008	2009	2010	2011	2012	2013	
En 2013 fue el 9% de la producción global de módulos solares	Energía Europea en TOE	639.200	1.205.600,00	1.935.100,00	3.896.100,00	5.795.600,00	6.953.300,00	TOE
1 MWh ----- 0,086 TOE X ----- 639.200 TOE	Energía Europea en MWh	7.432.558,1	14.018.604,7	22.501.162,8	45.303.488,4	67.390.697,7	80.852.325,6	MWh
si 0,09 ---- 7.432.558,1 1----- X	Energía Mundial	82.583.979,3	155.762.273,9	250.012.919,9	503.372.093,0	748.785.529,7	898.359.173,1	MWh
% mundial de células GaAs, según el diagrama de sectores de 2013 --> 1 % células GaAs en el mundo.	Energía que va destinada a células GaAs	825.839,8	1.557.622,7	2.500.129,2	5.033.720,9	7.487.855,3	8.983.591,7	MWh
células de Ga 0'0086 de material sobre una unidad	Energía que va destinada a Ga	7.102,2	13.395,6	21.501,1	43.290,0	64.395,6	77.258,9	MWh
células de As 0'9914 de material sobre una unidad	Energía que va destinada a As	818.737,6	1.544.227,2	2.478.628,1	4.990.430,9	7.423.459,7	8.906.332,8	MWh
Galio Total (GaAs + CIGS)	Energía que va destinada a Ga en células GaAs + CIGS	7.263,3	13.699,3	21.988,6	44.271,6	65.855,7	79.010,7	MWh

Dato para convertir los TOE a MWh [78]:

megawatt hour ↗

 MWh

tonne of oil equivalent ↗

0.085984522785899 toe

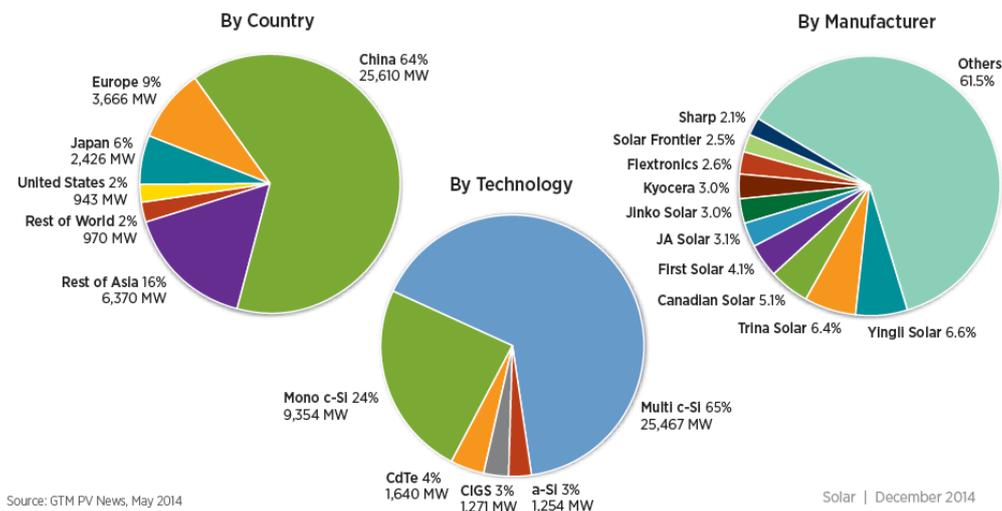
Conversión de la base : 1 MWh = 0.085984522785899 toe

Conversión de la base : 1 toe = 11.63 MWh

GASTOS ENERGÉTICOS DEL COBRE, INDIIO, GALIO Y SELENIO		2008	2009	2010	2011	2012	2013	
En 2013 fue el 9% de la producción global de módulos solares	Energía Europea en TOE	639.200	1.205.600,00	1.935.100,00	3.896.100,00	5.795.600,00	6.953.300,00	TOE
1 MWh ----- 0,086 TOE X ----- 639.200 TOE	Energía Europea en MWh	7.432.558,1	14.018.604,7	22.501.162,8	45.303.488,4	67.390.697,7	80.852.325,6	MWh
si 0,09 ---- 7.432.558,1 1----- X	Energía Mundial	82.583.979,3	155.762.273,9	250.012.919,9	503.372.093,0	748.785.529,7	898.359.173,1	MWh
% mundial de células CIGS, según quesito de 2013 es 3%	Energía que va destinada a células CIGS	2.477.519,4	4.672.868,2	7.500.387,6	15.101.162,8	22.463.565,9	26.950.775,2	MWh
células de Ga 0'000065 de material sobre una unidad	Energía que va destinada a Ga	161,0	303,7	487,5	981,6	1.460,1	1.751,8	MWh
células de In 0'000026 de material sobre una unidad	Energía que va destinada a In	64,4	121,5	195,0	392,6	584,1	700,7	MWh
células de Cu 0'9996 de material sobre una unidad	Energía que va destinada a Cu	2.476.528,4	4.670.999,1	7.497.387,4	15.095.122,3	22.454.580,5	26.939.994,9	MWh
células de Se 0'00037 de material sobre una unidad	Energía que va destinada a Se	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	MWh

Los porcentajes de las células sobre la cantidad de paneles producidos se han obtenido del siguiente gráfico (WORLDWIDE PHOTOVOLTAIC MANUFACTURING (2013):

Global Solar Module Production, 2013: 39,985 MW



16.5. Porcentajes de material reciclado al año

En esta tabla se tienen los ratios de reciclaje de cada material [48].

Metal	Production 2012, ton/year	P _{MAX} , ton/year	Z, % or g/ton	Y, %	Known extractable amounts estimate USGS (2012) ton	Recycling rate, %	Peak production year
Stone, gravel, sand	15,000,000,000	30,000,000,000	80	90	10,000,000,000,000	some	2030
Hydrocarbons	12,000,000,000	13,000,000,000	90	35	2,780,000,000,000	none	2020
Cement	3,700,000,000	4,000,000,000	—	—	Energy limited	some	2020
Biomaterial/wood	2,200,000,000	2,200,000,000		40	100,000,000,000	some	2020
Biofuels	2,200,000,000	2,200,000,000		40	100,000,000,000	none	2010
Polymers	2,100,000,000	2,100,000,000		30	Hydrocarbon limited	20	2015
Iron	1,300,000,000	2,100,000,000	55%	95	229,000,000,000	60	2055
Aluminium	44,000,000	48,000,000	50%	90	19,200,000,000	75	2020–2040
Manganese	18,000,000	22,000,000	55%	95	1,030,000,000	45	2050
Chromium	16,000,000	19,000,000	55%	95	437,000,000	22	2050
Copper	16,000,000	28,000,000	3%	95	558,000,000	60	2034
Zinc	11,000,000	16,000,000	6%	90	1,110,000,000	20	2030
Titanium	6,000,000	12,000,000	35%	75	3,600,000,000	40	2038
Lead	4,000,000	4,800,000	3%	95	693,000,000	65	2020
Nickel	1,700,000	3,000,000	1%	95	96,000,000	60	2025
Zirconium	900,000	1,500,000	8%	90	60,000,000	10	2025
Magnesium	750,000	10,000,000	40%	90	200,000,000,000	40	?
Tin	300,000	395,000	0.6–8%	80	76,200,000	20	2036
Molybdenum	280,000	340,000	0.6–8%		22,500,000	40	2045
Lithium	200,000	350,000	0.1–1%		4,900,000	10	2030
Antimony	180,000	250,000	0.5–5%	60	7,000,000	15	2018
Rare Earths	130,000	760,000	0.3–5%	85	100,000,000	15	2060
Cobalt	110,000	210,000	0.5–5%	90	11,600,000	40	2026
Tungsten	90,000	91,000	0.1–3%	80	2,900,000	40	2029
Vanadium	80,000	260,000	0.5–5%	80	19,400,000	40	2076
Niobium	68,000	110,000	0.5–5%	80	3,972,000	60	2025
Silver	23,000	27,000	10–50 g/t	90	1,308,000	80	2034
Cadmium	20,000	25,000		80	1,900,000	80	1998
Yttrium	8900	14,000			540,000	10	2035
Bismuth	7000	9000			360,000	15	2011
Gold	2600	3200	1–3 g/t	85	135,000	95	2016
Selenium	2200	2500		30	171,000	5	2022
Indium	670	1200	20–50 g/t	50	47,100	40	2022
Tantalum	600	1500			58,500	25	2005
Gallium	280	430	20–50 g/t	35	5200	15	2026
Palladium	200	240	3–5 g/t	90	36,000	60	2020
Platinum	180	200	3–5 g/t	80	44,100	70	2020
Germanium	150	300	2–10 g/t	35	12,500	30	2022
Tellurium	120	210	2–10 g/t	30	11,080	0	1984
Hafnium	20	10,000	1,500 g/t	10	1,000,000	80	2045
Rhenium	10	?	2–10 g/t	30	10,000	80	2045

16.6. Curiosidades sobre la energía solar fotovoltaica en el mundo

Puesto que este proyecto trata sobre la energía solar fotovoltaica a nivel mundial, se ha querido hacer una breve mención a datos curiosos sobre la fotovoltaica en el mundo.

Las 10 mayores plantas fotovoltaicas del mundo son [77]:

1. Longyangxia Hydro- Solar PV Station. 850 MW. China
2. Solar Star Solar Farm I y II. 579 MW. Estados Unidos
3. Desert Sunlightg Solar Farm. 550 MW. Estados Unidos
4. Topaz Solar Farm. 550 MW. Estados Unidos
5. Copper Mountain . 458 MW. Estados Unidos
6. Charanka Solar Park. 345 MW. India
7. Planta fotovoltaica de Cestas. 300 MW. Francia
8. Agua Caliente Solar Project. 290 MW. Estados Unidos
9. Antelope Valley Solar Ranch. 266 MW. Estados Unidos
10. Mount Signal Solar. 265,7 MW

Otro dato curioso es que cerca del río Támesis, en uno de los embalses que sacian la sed de Londres, flotan 23.000 paneles solares [78] que se funden en la distancia con la superficie cristalina del agua. Es la mayor planta solar flotante de Europa equivalente a ocho campos de fútbol. Los paneles ocupan al final el 6% del embalse. Más de 60.000 flotadores y 177 sistemas de anclaje han hecho falta para garantizar su estabilidad incluso en las condiciones climáticas más adversas.

Con esta instalación de 6,3 MW [78], que suministra energía limpia a la planta potabilizadora de Thames Water, el Reino Unido confirma su condición de «salvavidas» de la industria solar europea.

La energía solar fotovoltaica se usa incluso en:

Los aviones, como el llamado “Impulso Solar”, que es un proyecto europeo, el primer avión tripulado e impulsado solamente con energía solar, el cual ha dado la vuelta al mundo en los últimos años. El prototipo está tapizado de células fotovoltaicas y lleva baterías que almacenarán la energía generada para volar de noche.[25]

O en catamaranes, como el “Solemar” que es un catamarán de fabricación española de 12 metros de eslora y 4 metros de manga, con dos cascos



insumergibles y con capacidad para 40 pasajeros sentados bajo la sombra de los paneles solares instalados en el techo. A 5 nudos de velocidad, durante el día, sus dos motores eléctricos consumen la misma cantidad de energía que la generada por los paneles solares, es decir, no necesitan ninguna otra fuente de apoyo. El barco dispone de dos bancos de baterías de gel que le permiten, sin sol, una autonomía de 10 horas a 5 nudos de velocidad, y de 30 horas a 2 nudos.[25]

No se han tratado temas de falta de espacio en el despliegue de potencia instalada porque cada vez se utiliza más esta tecnología en cualquier parte, se puede ver en techos de garajes, farolas, bicicletas hasta en tiendas de campaña.