

# Análisis de Ciclo de Vida de un generador fotovoltaico de 1kW<sub>p</sub> dependencia geográfica de su impacto medioambiental

Lucía Serrano-Luján, Nieves Espinosa\*, Antonio Urbina\*\*

Departamento de Electrónica, Tecnología de computadores y Proyectos. ETSI Telecomunicaciones.

Campus Muralla del Mar 30202 Cartagena (Murcia). E-mail: lucia.serrano@upct.es

\* Danmarks Tekniske Universitet (DTU Energikonvertering)

\*\*Physics Department, Blackett Laboratory, Imperial College London (Reino Unido)

**Resumen.** En este artículo mostramos los resultados de la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida en una instalación fotovoltaica de 1kW<sub>p</sub> de capacidad, con módulos fabricados con tecnología de Teluro de Cadmio. Se ha medido su impacto en términos de kilos de CO<sub>2</sub> que se podrían evitar emitir a la atmósfera con su funcionamiento, y cómo varían estos valores en función del lugar donde se fabrique y donde finalmente se instale el sistema para su funcionamiento, es decir, la dependencia geográfica del impacto, incluyendo el transporte de los componentes.

## 1. Introducción

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que permite medir el impacto medioambiental de un producto o servicio durante todas las etapas de su vida. En los últimos años esta herramienta se ha aplicado en el campo de las energías renovables porque da lugar a índices ampliamente utilizados para comparar los impactos de los distintos tipos de tecnologías.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> provocadas por un producto o servicio, también conocido como *huella de carbono*, es uno de los índices medidos por el ACV. Aplicado a las tecnologías fotovoltaicas, estas emisiones se deben principalmente al uso de las fuentes fósiles en la generación de energía. Ésta energía se utiliza desde el inicio del ciclo de vida del producto en su fabricación, en algunos casos también durante la vida del mismo, y finalmente en su etapa final, desmantelamiento o reciclado.

En las últimas cuatro décadas el suministro mundial de energía ha sido suministrado principalmente por fuentes fósiles, duplicando el consumo energético en este período. Según el último informe de la Agencia Internacional de la Energía [1], el mundo está fracasando en su intento de conducir el sistema energético mundial por una senda más sostenible. A pesar que los países de la OCDE apenas han aumentado la demanda de energía y se alejan del petróleo y del carbón en beneficio del gas natural y las energías renovables, se prevé que la demanda mundial de energía crecerá más de un tercio hasta 2035 [2]. Los combustibles fósiles siguen siendo predominantes en el mix energético mundial. En este escenario se estima que las emisiones se corresponden con una subida de la temperatura media global a largo plazo de 3,6°C.

Las energías renovables son parte indispensable del mix energético para reducir las emisiones; para 2035, las energías renovables supondrán casi un tercio de la producción total de electricidad. La energía solar

fotovoltaica crece más rápidamente que cualquier otra tecnología renovable.

El mayor impacto medioambiental en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> producido por las fuentes energéticas renovables, y en concreto la fotovoltaica, se produce en la fase de fabricación, en su posterior transporte hasta el lugar de instalación y en su fase de desmantelamiento en el fin de su vida. Durante la fase de uso, la energía producida es limpia, y evitará la emisión de gases a la atmósfera porque sustituirá otras fuentes de generación de energía no renovables.

En este artículo se calculan las emisiones que evitaría una instalación fotovoltaica descrita en la sección 2, siguiendo la metodología basada en ACV en la sección 3. Finalmente en la sección 4 se muestra la dependencia geográfica del impacto medioambiental.

## 2. Instalación fotovoltaica - CdTe de 1kW<sub>p</sub>

Hemos realizado el estudio sobre una instalación con tecnología CdTe de 1kW<sub>p</sub> de potencia instalada. Se trata de una tecnología de capa delgada en competencia directa con las tecnologías basadas en el silicio (silicio multi-cristalino y mono-cristalino), que son las más utilizadas. Para realizar el estudio suponemos una eficiencia estándar en este tipo de tecnologías, un 14%. Hemos basado los parámetros del estudio en datos de módulos comerciales [3] con las siguientes características:

**Tabla 1.** Características de los módulos considerados en estudio de CdTe [3]

| Tipo de módulo                      | CdTe                      |
|-------------------------------------|---------------------------|
| Eficiencia                          | 14%                       |
| Peso                                | 11,60 kg/m <sup>2</sup>   |
| Años de vida útil                   | 25                        |
| Energía consumida en su fabricación | 171,18 kWh/m <sup>2</sup> |
| Performance Ratio                   | 0,7                       |

La metodología y resultados se basan en el estudio del impacto de 1 kW<sub>p</sub> de esta instalación.

### 3. Metodología

Con el objetivo de comparar las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas gracias al funcionamiento del sistema descrito en la sección anterior, y así estudiar la dependencia geográfica, vamos a definir la ecuación y parámetros que nos guiarán en el cálculo:

$$CO_2 = CO_{2\_mix} - CO_{2\_fabricación} - CO_{2\_transporte}$$

Donde,

CO<sub>2</sub>\_mix: emisiones de CO<sub>2</sub> que se emiten por la generación de electricidad utilizando el mix energético del país, en sustitución a la energía que generaría el sistema fotovoltaico.

CO<sub>2</sub>\_fabricación: emisiones generadas en la fabricación del sistema

CO<sub>2</sub>\_transporte: emisiones generadas por el transporte del sistema desde el lugar de su fabricación hasta el de su instalación

CO<sub>2</sub>: kilos de emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas en un año por el funcionamiento de la instalación (promediado a lo largo de la vida útil del sistema).

En las siguientes subsecciones se describen con detalle cada uno de los términos anteriores.

#### 2.1. Emisiones de CO<sub>2</sub>- fabricación

Las emisiones durante la fabricación de la instalación son producidas, no sólo por el uso de corriente eléctrica para el funcionamiento de maquinaria, sino también por la generación de calor. Por ello para calcular las emisiones totales tendremos en cuenta los gramos de CO<sub>2</sub> emitidos por kWh de energía primaria, concepto que engloba energía eléctrica y térmica. Este dato es dependiente del país fabricante, por tanto dependerán del mix energético de éste.

Por ejemplo, en un país donde se genere la energía en gran porcentaje utilizando combustibles fósiles, el CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera por kWh de energía generada será mayor que en otro país con un mix energético más limpio, es decir, un país que tenga una mayor generación de electricidad a partir de fuentes renovables (hidráulica, eólica, fotovoltaica, geotérmica, etc.). Instalándose en un país con mix energético más sucio, el sistema evitará más emisiones a la atmósfera que si se instalase en un país con un mix más limpio.

Los datos utilizados para el cálculo de energía necesaria para fabricar los módulos de Teluro de Cadmio son los siguientes:

Tabla 2. Energía consumida en la fabricación del módulo

| Referencia | MJ/m <sup>2</sup> módulo |
|------------|--------------------------|
| CdTe [4]   | 1925                     |
| CdTe [4]   | 1326,00                  |
| CdTe[5]    | 2031,00                  |

Se ha utilizado finalmente la media de estos valores, es decir, 1760,67 MJ/m<sup>2</sup> de módulo. Se supone una vida útil del sistema fotovoltaico de 25 años.

#### 2.2. Emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas por el uso del generador fotovoltaico

El uso de un generador fotovoltaico evita utilizar otras fuentes de energía en su lugar, es decir, el consumo del mix energético del país donde se instala, equivalente a la energía que genera el sistema fotovoltaico.

Este dato hace referencia a los gramos de CO<sub>2</sub> emitido por kWh eléctrico, ya que suponemos que la energía que produce la instalación fotovoltaica se inyecta directamente en red (a diferencia de los kWh primario que utilizamos antes).

La cantidad de energía generada por el sistema va a depender de la localización del mismo, puesto que llegarán distintos valores de irradiancia en función de la latitud y altitud. Las irradiancias que se han supuesto para cada emplazamiento del sistema estudiado son las siguientes:

Tabla 3. Irradiancia media anual de los países considerados en el estudio [6].

| País                 | Irradiancia kWh/m <sup>2</sup> /año |
|----------------------|-------------------------------------|
| Cuba                 | 2050,00                             |
| China Este           | 1733,75                             |
| China Oeste          | 2646,25                             |
| España               | 1666,00                             |
| Dinamarca            | 969,68                              |
| UK                   | 953,49                              |
| Colombia Norte       | 1551,25                             |
| Colombia Sur         | 1003,75                             |
| República Dominicana | 2144,37                             |
| USA Este             | 1551,25                             |
| USA Oeste            | 2828,75                             |
| Alemania             | 1131,00                             |

#### 2.3. Emisiones de CO<sub>2</sub> debidas al transporte

Estas emisiones son las que se producirían por el transporte de los módulos desde el país fabricante hasta el país donde se instalará.

Para calcular estas emisiones se han medido las distancias entre los pares de países *fabricante-cliente*.

En los transportes por tierra, se ha considerado el impacto de un camión de entre 3.5 y 7 toneladas de carga, siendo este dato 0,000472 kg CO<sub>2</sub> por kilómetro [7]. En el transporte transoceánico se ha considerado el impacto de un buque de carga con una emisión de 0,0107 kg CO<sub>2</sub> por kilómetro [7].

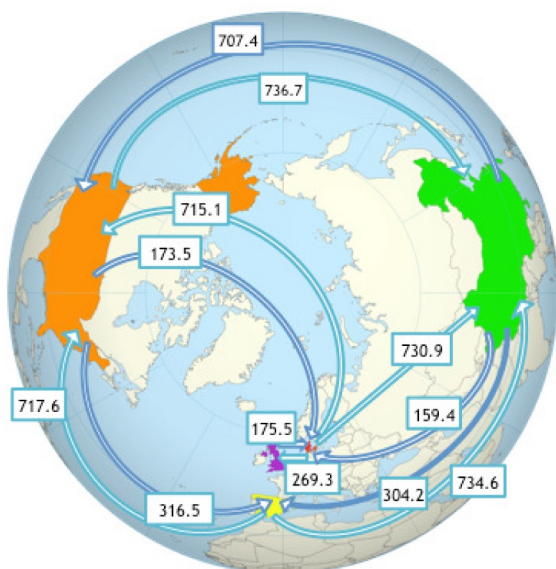
### 3. Resultados

Siguiendo la metodología anterior se han calculado los kilos de CO<sub>2</sub> que se evitarían emitir a la atmósfera en un año gracias al funcionamiento de 1kW<sub>p</sub> de potencia de módulos fotovoltaicos de Teluro de Cadmio. Como muestra la tabla 4, teniendo en cuenta el mix energético del país que reemplaza el sistema en función de su ubicación, se pueden evitar emitir hasta 740 kilos de CO<sub>2</sub> por año de funcionamiento.

En la Fig. 1 se reflejan las diferencias que existe entre las emisiones evitadas en función del par de países *fabricante-cliente*. El ahorro de CO<sub>2</sub> emitido puede ser hasta 5 veces mayor en una combinación de países que en otra, en función de qué país juega el rol de fabricante o usuario de la tecnología.

Las mayores cantidades de CO<sub>2</sub> se evitan emitir en los países con un mix energético más sucio. Así, por ejemplo, China tiene un índice de emisión de 0,635 kg CO<sub>2</sub> por kWh primario generado. Mientras que este mismo índice en Dinamarca tiene un valor de 0,303.

En la tabla 4 se ha muestra en anaranjado el par *fabricante-cliente* con menos ahorro de CO<sub>2</sub>, y en amarillo la combinación con mayor ahorro, que coincide con el país fabricante (Colombia) con índice de emisión de CO<sub>2</sub> más limpio en el estudio debido al amplio porcentaje en su mix energético de generación hidráulica, y la instalación del sistema en un país con altas emisiones asociadas a su mix energético (China).



**Fig. 1.** Kilos de CO<sub>2</sub> anuales evitados en función del país de fabricación (origen de la flecha) y el país de ubicación de la instalación fotovoltaica

**Tabla 4.** Emisiones evitadas según la combinación entre el lugar de fabricación (columna izquierda) y el lugar de instalación (fila superior) (Kg de CO<sub>2</sub> evitados por 1kW<sub>p</sub> CdTe por año).

| Kg de CO <sub>2</sub> evitados/<br>kW <sub>p</sub> año | Ubicación instalación |        |           |       |       |          |
|--|-----------------------|--------|-----------|-------|-------|----------|
|  | China                 | España | Dinamarca | UK    | USA   | Alemania |
| China  | 733.6                 | 304.2  | 159.4     | 254.7 | 707.4 | 487.0    |
| España   | 734.6                 | 319.7  | 175.9     | 271.2 | 717.6 | 503.2    |
| Dinamarca  | 730.9                 | 316.8  | 174.6     | 269.3 | 715.1 | 501.2    |
| UK   | 733.1                 | 318.0  | 175.5     | 270.6 | 716.6 | 502.1    |
| Colombia   | 740.8                 | 322.1  | 178.7     | 273.9 | 724.4 | 505.3    |
| República Dominicana                                   | 734.0                 | 316.4  | 172.8     | 267.2 | 719.3 | 499.5    |
| USA  | 736.7                 | 316.5  | 173.5     | 267.9 | 719.1 | 499.8    |
| Alemania   | 733.7                 | 317.1  | 174.1     | 268.5 | 717.2 | 503.1    |

### 4. Conclusiones

La energía solar fotovoltaica tiene un gran potencial para mitigar los efectos del Cambio Climático evitando emisiones de CO<sub>2</sub> al sustituir el consumo de combustibles fósiles. Una solución global tendría efectos óptimos, ya que este potencial se ve incrementado gracias a una correcta combinación entre los lugares de fabricación e instalación de los sistemas fotovoltaicos a nivel mundial. Se ha comprobado además que el impacto del lugar de instalación es mucho mayor (variaciones de hasta 360%) que el del lugar de fabricación (variaciones de hasta el 14%). Finalmente se demuestra que el impacto del transporte es bajo, como máximo suponiendo en algún caso un 4% de las emisiones de CO<sub>2</sub> totales evitadas.

### Referencias

- [1] International Energy Agency (2012) Key World Energy Statistics.
- [2] International Energy Agency (2012) World Energy Outlook. Resumen ejecutivo
- [3] SOLARIS, Serie FS 2 First Solar. [www.solaxis.de](http://www.solaxis.de)
- [4] Kato, K., Hibino, T., Komoto, K., Ihara, S., Yamamoto, S. and Fujihara, H. (2001) Solar Energy Materials and Solar Cells, 67, 279-287.
- [5] Raugei, M., Bargigli, S., Ulgiati, S. (2007) Energy, 32, 1310-1318.
- [6] PVGIS, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [7] Ecoinvent Centre. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <http://www.ecoinvent.org/database/>