

OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

Mi Ra Kim, Viviana Goldsmidt, Rosa Pampena, Karina Marcos, Ana María Martínez
Grupo de Estudios Sobre Energía, Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional
Av. Sáenz 631, C.P.1437, Ciudad de Buenos Aires, República Argentina
Fax : (54) (11) 4911-3349 E-Mail : mirakim@rec.utn.edu.ar

RESUMEN: El presente trabajo ha estudiado la potencial optimización de los recursos naturales dentro del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos, basados en celdas de silicio monocristalinas (las cuales representan un importante porcentaje del mercado, mayor del 30%).

En particular, se analizó la conveniencia de reciclar el vidrio y el aluminio que constituyen la estructura de los paneles y cuyos respectivos procesos de recuperación se encuentran ampliamente desarrollados y difundidos, obteniéndose un considerable ahorro de materias primas y energía.

ABSTRACT: This work studies the potential optimization of natural resources in the life cycle of photovoltaic panels based on monocrystalline silicon cells.

Particularly the convenience of glass and aluminum recycle has been analyzed, whose recovery process are widely made known and developed, getting a considerable saving of raw materials and energy.

PALABRAS CLAVE: aluminio, vidrio, ciclo de vida, paneles fotovoltaicos, ahorro, recursos naturales

INTRODUCCIÓN

La norma IRAM - ISO 14040/98 define al ciclo de vida como las “etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema producto, a partir de la adquisición de materia prima o de su extracción a partir de recursos naturales hasta la disposición final”.

El panel fotovoltaico, capaz de generar corriente continua a partir de la incidencia de la luz solar sobre su superficie; es un conjunto integrado por celdas fotovoltaicas, conectadas en serie, encapsuladas en una delgada capa de material plástico elástico (etil vinil acetato), un frente de vidrio plano templado, y una cara posterior plástica (tedlar-poliéster); ensamblado y enmarcado con perfiles de aluminio anodizado.

DESCRIPCION DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN

Fabricación de los paneles fotovoltaicos

El estudio se ha basado en la fabricación de paneles construidos a partir de celdas de silicio monocristalinas, dado que representan un importante porcentaje del mercado (mayor del 30%).

Las etapas requeridas para fabricar un panel son básicamente las que se describen a continuación:

1. *Obtención del silicio grado metalúrgico (98%):* consiste en la reducción carbotérmica (1400°C - 1500°C) del dióxido de silicio y carbón de coque en horno de arco eléctrico, dando lugar a la liberación de monóxido de carbono.
2. *Obtención del silicio grado semiconductor (99,99%):* uno de los procesos más utilizados para su obtención es la reducción con hidrógeno del triclorosilano obtenido a partir de la reacción del silicio grado metalúrgico con ácido clorhídrico, conocido como Método Siemens. Durante este proceso se libera cloro, cloruro de fósforo y de níquel.
3. *Fabricación de las celdas fotovoltaicas:* en primer lugar se obtiene el lingote de silicio monocristalino (Método Czochralski), a partir del cual se cortan las obleas y pulen o decapan químicamente. Posteriormente, se les forma la junta PN, utilizando boro y fósforo, se les efectúa un tratamiento antirreflectante, y se realiza la metalización y sinterizado de las mismas.
4. *Armado del panel fotovoltaico:* comienza con la interconexión eléctrica de las celdas, las que luego se encapsulan con etil vinil acetato (EVA) y ensamblan, colocando una cubierta de vidrio templado de bajo contenido de hierro en la cara que mira al sol, y en la cara posterior, una lámina plástica multicapa (Tedlar - Poliester) resistente a la acción mecánica, opaca y de color claro para reflejar la luz. Al conjunto ensamblado se le realiza un posterior laminado y curado para lograr la perfecta adhesión de los distintos componentes y obtener así una sola pieza. Finalmente, se enmarca con perfiles de aluminio anodizado provistos de las perforaciones necesarias para su montaje, y se colocan las conexiones eléctricas externas.

Fabricación del vidrio templado plano de bajo contenido de hierro

El vidrio templado plano utilizado en el armado de los paneles es de bajo contenido de hierro, lo cual le confiere una excelente captabilidad de los rayos ultravioleta e infrarrojos, resistencia a las altas temperaturas y capacidad de operar bajo condiciones climáticas extremas.

El proceso de fabricación puede resumirse en las siguientes etapas:

- *Cribado*: pesada y dosificación de las materias primas (carbonato de sodio, carbonato de calcio, carbonato de magnesio, agua y dióxido de silicio) que se reciben ya purificadas.
- *Secado*: la mezcla se seca mediante el empleo de una corriente de aire seco.
- *Mezclado*: las materias primas son homogeneizadas en una mezcladora cerrada.
- *Fusión*: los componentes sólidos son llevados al estado vítreo dentro de hornos de cuba en los que se emplea como combustible gas natural.
- *Templado y estirado*: el vidrio obtenido se enfría lentamente hasta la temperatura ambiente mediante un sistema de refrigeración con agua y ventilación. El estirado se hace en conjunto al templado, empleándose para ello un máquina de estiraje compuesta por rodillos por la que se desplaza la masa vítrea.
- *Recocido*: las láminas son introducidas a un horno de recocido en la que se le aplica un nuevo salto térmico y posteriormente un brusco enfriamiento a fin de extraerle todas las tensiones superficiales.
- *Acabado*: las láminas son pulidas con arena para el esmerilado grueso, y luego con materiales mas blandos como el óxido de selenio para el esmerilado fino.
- *Corte*: esta operación se realiza en mesa provistas con herramientas diamantadas que marcan la superficie de corte sobre la que después se realiza un esfuerzo de tracción, consiguiendo que la fisura se propague en el espesor.

Fabricación de los perfiles de aluminio anodizado

Las etapas requeridas para fabricar los perfiles de aluminio anodizado utilizados en la confección de los paneles son básicamente las que se describen a continuación:

1. *Obtención de la alúmina grado metalúrgico (Proceso Bayer)*:
La alúmina se obtiene a partir de la bauxita ($Al_2O_3 \cdot xH_2O$) molida y luego tratada con una solución concentrada de hidróxido de sodio (NaOH) 25% (200 - 240°C y hasta 30 atm), formando aluminato de sodio ($NaAlO_2$). En una etapa posterior, la solución es enfriada y diluida con agua con lo que se logra descomponer el aluminato de sodio en alúmina hidratada ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$), compuesto insoluble que se separa en la etapa denominada precipitación, y luego es filtrada y lavada. La solución de NaOH restante es concentrada y reintroducida en el proceso. Finalmente, la alúmina hidratada es calentada por encima de los 1000°C (calcinación) eliminándose el agua. La alúmina obtenida es un polvo fino y blanco, generalmente es de alta pureza, con pequeñas cantidades de óxidos de silicio, sodio, calcio, etc.
2. *Obtención del aluminio anodizado (Proceso Hall Heroult)*
Consiste en la electrólisis de la alúmina grado metalúrgico, utilizándose celdas con ánodos de carbón grafito. Las celdas electrolíticas son contenedores de acero en forma de caja. Dentro de cada una de ellas hay un compartimento catódico recubierto con una mezcla apisonada de brea y carbón de antracita o coque de elevada pureza para evitar la contaminación del metal producido. Dentro de la cuba de electrólisis están contenidos en estado líquido, un depósito de aluminio y una mezcla de alúmina, criolita (Na_3AlF_6) y otros componentes, a los que se denomina baño electrolítico. La criolita no participa en forma directa en la reacción, sólo ofrece un medio apropiado para que la reacción se pueda llevar a cabo a nivel industrial. Dado que la temperatura de operación varía entre 950 y 965°C, el aluminio, cuyo punto de fusión es 660°C, permanece en estado líquido. Durante la electrólisis se desprenden CO, CO₂ y gases que resultan de la descomposición de los fluoruros. El baño electrolítico que se genera no constituye un residuo sino un subproducto porque puede ser empleado nuevamente para nuevas cubas o vendido. Los ánodos (trozos de carbón limpios) se retiran de las celdas antes de completar su consumo total (con un 25% del tamaño del ánodo original) y son molidos y mezclados con el coque para fabricar un nuevo ánodo, de manera que todo el carbón es reciclado.
3. *Confección de los perfiles*

RECICLADO DEL VIDRIO Y EL ALUMINIO

Durante el ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos se utilizan recursos no renovables. En particular, el vidrio y el aluminio que constituyen la estructura de los paneles fotovoltaicos desechados al finalizar su vida útil, pueden ser reutilizados como materia prima en la fabricación de los mismos materiales.

» *Reciclado del vidrio*

El vidrio utilizado en la fabricación de los paneles fotovoltaicos es bajo en impurezas y de una composición específica, por lo cual podría ser empleado como materia prima hasta en un 100%. Sin embargo, diversos ensayos han demostrado que cantidades mayores al 85% provocan un sensible incremento de la fragilidad del vidrio obtenido.

Si bien el vidrio que integra el panel lleva adosada una capa de EVA, esto no impide su reciclado por fusión, dado que el EVA posee una temperatura de fusión próxima a los 76°C, la cual está muy por debajo de la del vidrio (1500-1600°C). Esto

permite que el EVA se descomponga en CO y CO₂, pudiendo eliminarse junto con los restantes gases generados durante el proceso de fusión.

El vidrio obtenido a partir de los paneles descartados deberá seguir las siguientes etapas:

1. *Triturado*: alimentadores vibratorios lo trasladarán hacia quebrantadoras de martillos, donde será triturado en trozos no mayores a los 25 mm de diámetro.
2. *Tamizado*: Una cinta transportadora hará pasar los trozos de vidrio por una cámara de soplado donde el polvo de vidrio será retenido en filtros, a fin de evitar que se volatilice junto con los gases de combustión, impidiendo de esta manera la contaminación ambiental.
3. *Lavado*: Una máquina lavadora, mediante agua caliente y agitación, terminará de extraer el polvo remanente.
4. *Secado*: El material se decantará y secará, para ser finalmente conducido hasta el horno de fusión.

» *Reciclado del aluminio*

A diferencia del vidrio la reutilización del aluminio puede ser del 100%, dado que puede ser refundido sin perder sus características físico - químicas.

El reciclado del aluminio sigue las siguientes etapas:

1. *Triturado ("Shreding")*: operación mecánica que consiste en cortar el material reduciéndolo a pequeñas dimensiones.
2. *Fusión*: los fragmentos son fundidos en un horno rotativo, utilizándose como fundente Na Cl, KF y Ca F₂.
3. *Horno de mantenimiento y colada*: al metal fundido se le efectúan las correcciones de composición química que fueran necesarias y los tratamientos que indican las normas para el baño líquido.
4. *Desgasificado*: la unidad de desgasificado consiste de un eje rotor por el cual se inyecta un gas inerte a presión que provoca el arrastre de los gases hacia la superficie y la flotación de las muy pequeñas impurezas existentes en la masa de aluminio líquido. Como desgasificante se puede utilizar hexacloroetano (C₂Cl₆).
5. *Filtrado*: la unidad de filtrado permite retener en un filtro cerámico poroso las impurezas aún presentes en el baño.
6. *Colada*: el metal obtenido es colado en lingotes o placas. Se obtiene un metal apto para iniciar nuevamente el proceso tecnológico de fabricación de material destinado a la producción de los nuevos perfiles.

RESULTADOS OBTENIDOS

Las figuras 1 y 2 presentan de manera esquemática el ciclo de vida de un panel fotovoltaico (Siemens M60S). La figura 2 muestra el ciclo de vida optimizado mediante el reciclado del vidrio y el aluminio que integran la estructura del panel.

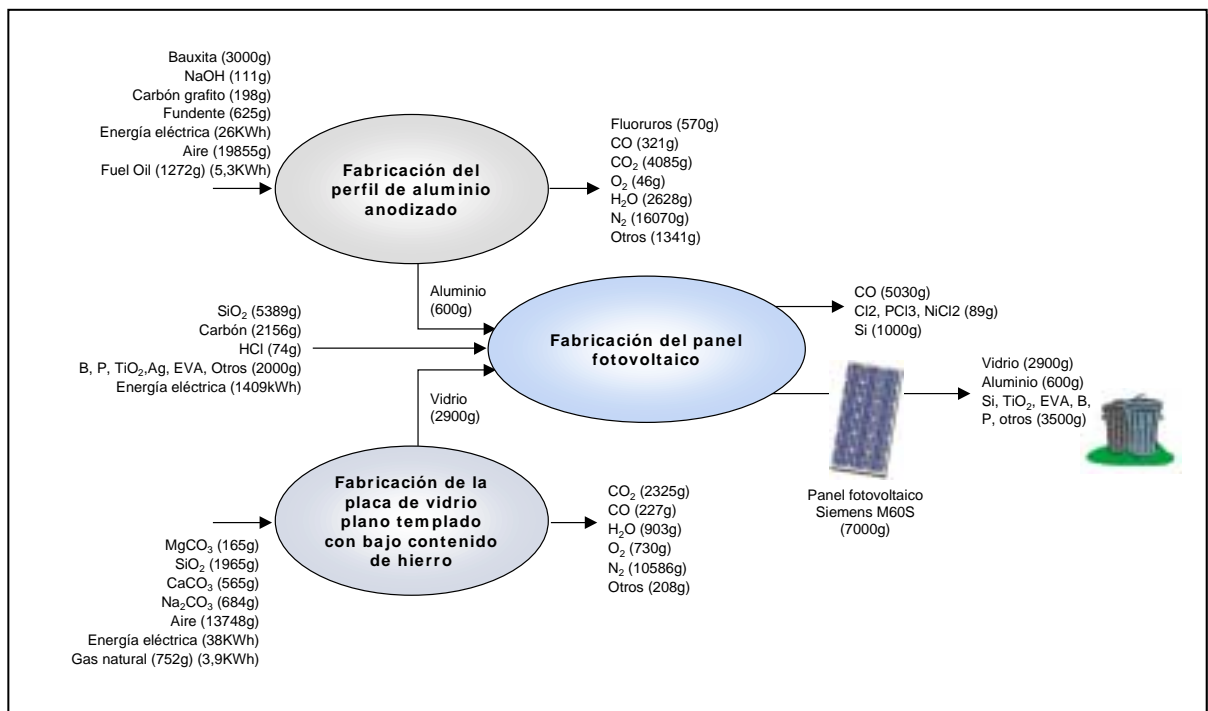


Figura 1. Ciclo de vida de un panel fotovoltaico

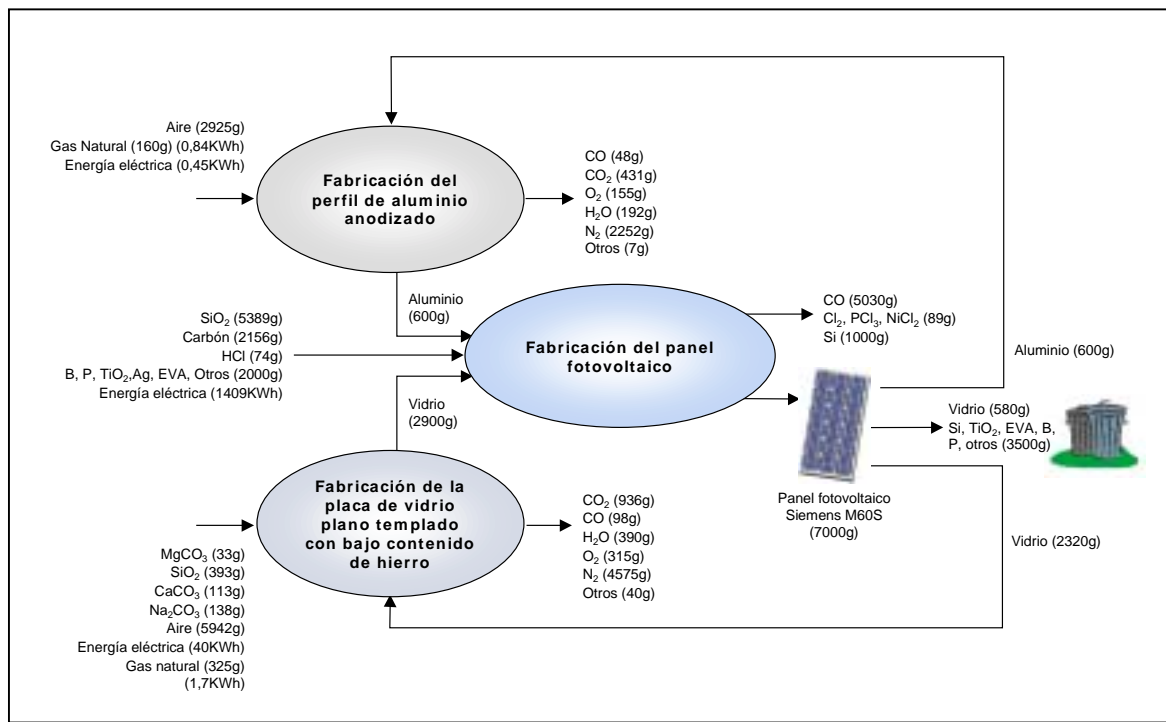


Figura 2. Ciclo de vida de un panel fotovoltaico con reciclado del vidrio y el aluminio

Procesos de fabricación	Materia prima y energía utilizada	% Ahorro
Fabricación de la placa de vidrio templado plano con bajo contenido de hierro	MgCO ₃ , SiO ₂ , CaCO ₃ , Na ₂ CO ₃	80
	Gas natural	56,8
Fabricación del perfil de aluminio anodizado	Bauxita, Criolita, Hidróxido de sodio, Fuel Oil	100
	Energía eléctrica	95

Tabla 1. Ahorro de recursos naturales a partir del reciclado del vidrio y aluminio

CONCLUSIONES

El reciclado del vidrio y el aluminio que constituyen la estructura del panel fotovoltaico presenta las siguientes ventajas:

- Preservación de recursos naturales: importante ahorro de materias primas (valores superiores al 80%).
- Disminución del consumo energético (alrededor del 5%).
- Reducción de la contaminación ambiental: menor generación de contaminantes tales como monóxido, dióxido de carbono, y fluoruros (aproximadamente 45%).
- Disminución de los residuos: mayor vida media de los rellenos sanitarios, y reducción de los costos de disposición.

REFERENCIAS

- Austin (1988). Manual de procesos químicos en la industria, Tomo II.
- Ferrandis V. A. y Sánchez Conde M. C. (1962). Fabricación del vidrio. Editorial Aguilar.
- Kirk E. y Othmer F. (1976). Enciclopedia de la tecnología química.
- Mali E. (1982). Los vidrios. Editorial Américo Iee.
- Mc Cormick (1985). Silicon Processing for Photovoltaico I, pp. 3-47.
- Phillips C. J. (1947). El vidrio. Editorial Reverté.
- Sirtl (1985). Procesado de material de silicio de grado solar, Energía solar fotovoltaica , pp. 36-39.
- Van Overstraeten, J. y Lauwers, P. (1985). Fabricación de células solares, Energía solar fotovoltaica , pp. 40-43.
- Waganoff N. (1963). Hornos industriales. Editorial Librería Mitre.
- Yukinori Kuwano (1985). Ullmann's Enciclopedia of Industrial Chemistry, Vol. 20.