

**ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DE DIFERENTES TIPOS DE PANELES
SOLARES SEGÚN LOS MATERIALES UTILIZADOS Y LOS COMPONENTES
TÓXICOS GENERADOS**

CARLOS ANDRES GUZMAN NIÑO

**FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2017**

**ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DE DIFERENTES TIPOS DE PANELES
SOLARES SEGÚN LOS MATERIALES UTILIZADOS Y LOS COMPONENTES
TÓXICOS GENERADOS**

CARLOS ANDRES GUZMAN NIÑO

Monografía para optar por el título de Especialista en Gestión Ambiental

**ASESOR
JIMMY EDGARD ALVAREZ DIAZ
Biólogo Doctor**

**FUNDACION UNIVERSIDAD AMERICA
FACULTAD DE EDUCACION PERMANENTE Y AVANZADA
ESPECIALIZACION EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2017**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma director especialización

Firma Calificador

Bogotá, D.C. 26 de Octubre de 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García Peña

Decano Facultad de Educación Permanente y Avanzada

Dr. Luis Fernando Romero Suarez

Director Especialización en Gestión Ambiental

Dr. Francisco Archer Narvaez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documentos. Estos corresponden únicamente al autor.

DEDICATORIA

A mis padres, y hermana por ser los motores de mi vida y siempre apoyarme en todos los proyectos que realizo en mi vida dándome motivación y lo más importante amor.

A Lorena Tafur que ha estado conmigo en las buenas y en las malas y siempre apoyándome sin importar los errores que he cometido siendo no solo mi compañera de estudio sino de vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis papás por ser mi más grande motivación e inspiración para seguir creciendo profesionalmente.

Un agradecimiento al profesor Jimmy Álvarez, por su apoyo, tiempo, paciencia y dedicación durante la elaboración de este proyecto.

Gracias a los profesores que durante la especialización me brindaron su apoyo y me enseñaron a sentir más pasión por la Gestión Ambiental.

Agradezco al Doctor Francisco Archer, por hacer un gran papel como director de la Especialización.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	14
OBJETIVOS	15
1. MARCO CONCEPTUAL	16
1.1 PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS	16
1.1.1 Panel solar de Cd-Te	18
1.1.2 Panel solar de Mono Silicio	19
1.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS	21
1.3 PROBLEMAS AMBIENTALES	24
1.3.1 Fauna y Habitat	25
1.3.2 Agua	25
1.4 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	25
2. METODOLOGIA	27
2.1 IDENTIFICACION DEL INVENTARIO (FLUJO DE ENTRADAS Y SALIDAS)	27
2.2 IDENTIFICACION DE LOS ASPECTOS AMBIENTALES	27
3. PROCESOS DE FABRICACION DE LOS PANELES	29
3.1 DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN	29
3.1.1 Paneles de Cd-Te	29
3.1.2 Paneles de silicio	31
4. IDENTIFICACION DEL INVENTARIO	35
4.1 INVENTARIO PARA LOS PANELES	35
4.1.1 Inventario para el panel de silicio	35
4.1.2 Inventario paneles de Cd-Te	36
4.2 COMPARACION DE SALIDAS	39
5. ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES	41
5.1 HUELLA DE CARBONO PANEL DE SILICIO	41
5.2 HUELLA DE CARBONO PANEL DE Cd-Te	44
6. CONCLUSIONES	48
7. RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	50

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1.Ventajas y desventajas del silicio mono cristalino	19
Cuadro 2.Ventajas y desventajas del silicio mono cristalino	20

LISTA DE GRAFICAS

	pag.
Grafica 1.Diagrama de proceso panel Cd-Te	29
Grafica 2.Diagrama de proceso panel de Silicio	32
Grafica 3.Emisiones generadas por cada proceso en paneles de Si	39
Grafica 4.Emisiones generadas por cada proceso en paneles de Cd-Te	40
Grafica 5.Porcentaje de cada uno de los procesos en la huella de carbono para el panel de silicio	44
Grafica 6.Porcentaje de cada uno de los procesos en la huella de carbono para el panel de Cd-Te	47

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.Celda fotovoltaica	17
Figura 2.Instalación solar fotovoltaica sin inversor	18
Figura 3.Instalación solar fotovoltaica con inversor	18
Figura 4.Conexión de células en serie con corriente resultante	23
Figura 5.Conexión de células en paralelo, con corriente resultante	24

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Entradas y salidas de materiales y energía para todos los procesos de un panel de Silicio	35
Tabla 2. Entradas y salidas de materiales y energía para todos los procesos de un panel de Cd-Te	37
Tabla 3. Fuentes de energía en cada proceso de los paneles de Silicio	41
Tabla 4. Emisiones generadas en kgCO ₂ para cada uno de los procesos del panel de silicio	43
Tabla 5. Fuentes de energía en cada proceso de los paneles de Cd-Te	45
Tabla 6. Emisiones generadas en kgCO ₂ para cada uno de los procesos del panel de Cd-Te.	46

RESUMEN

La presente monografía contó con varias fases, dónde en la primera de estas se realizó la identificación de los procesos involucrados en la construcción de los paneles solares de Silicio y Cd-Te, además de dar una descripción de cada una de estas etapas para los dos tipos de paneles ya mencionados, en la segunda parte se realizó un inventario basando en la metodología del ciclo de vida de la norma técnica colombiana iso 14040, para cada proceso en donde se identificaron los materiales, componentes utilizados y emisiones producidas para cada proceso, en esta misma fase se compararon las salidas de emisiones para cada proceso confrontándolos entre ellos realizando un inventario con todas cada una de las entradas y salidas de cada etapa ya mencionada determinando los procesos con mayores impactos negativos para el medio ambiente. Para terminar, se llevó acabo el cálculo de la huella de carbono en primera instancia para cada uno de los procesos involucrados en la fabricación de los dos tipos de paneles ya mencionados, y finalizando con la comparación de los paneles de Silicio y Cd-Te en cuanto a la cantidad de emisiones que liberan hacia el ambiente

Palabras claves: Panel solar fotovoltaico, célula fotovoltaica, eficiencia, ángulo

INTRODUCCION

“Procuremos siempre que nuestros actos, dejen una huella verde en nuestro camino”.

Anónimo

Con el desarrollo del presente proyecto, se espera indagar sobre las alternativas que la industria está asumiendo para disminuir la huella de carbono en la fabricación de paneles fotovoltaicos de Silicio y de Cd-Te. La aproximación que se propone para conocer los detalles en la fabricación de los paneles solares que aumentan las emisiones de CO₂, durante el ciclo de vida del proceso de fabricación, se relaciona con el cálculo de la huella de carbono, a través de la aplicación de la calculadora desarrollada por la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME). El resultado esperado del cálculo anterior, son la cuantificación de las emisiones de cada uno de los estas del proceso de fabricación de cada una de los dos tipos de paneles estudiados. De forma que, estos resultados puedan compararse entre sí para determinar cuál de los dos tipos de paneles generan mayor cantidad de impactos negativos para el medio ambiente. Esta aproximación de análisis del problema energético planteado, intenta responder el séptimo de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU. Este objetivo que reza “garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos” tiene como meta de aquí al 2030, “garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos”.

Esta monografía utilizó la metodología señalada en la norma técnica colombiana NTC-ISO 14040 y la 14041, que proponen la elaboración de un diagrama de procesos que especifique cada una de las etapas concernientes a la fabricación de los dos tipos de paneles fotovoltaicos: de Silicio y Cd-Te. Posteriormente, se determinaron las entradas y salidas de energía para cada una de las etapas identificadas, para así poder determinar el cálculo de la huella de carbono. La energía solar se ha convertido en una buena alternativa para disminuir la contaminación causada por el alto uso de los hidrocarburos; una solución frecuentemente incentivada alrededor del mundo, es la implementación de tecnologías que utilicen la energía solar, como los paneles solares fotovoltaicos que podrían constituirse en una buena alternativa para disminuir la contaminación causada por el alto uso de hidrocarburos. Sin embargo, se ha estudiado poco sobre la contaminación ocasionada por las emisiones de algunos de los componentes utilizados en la fabricación de estos paneles solares y la toxicidad que generan al momento de terminar su vida útil. Es por esto que se hace pertinente indagar sobre los impactos provocados durante la fabricación de los paneles solares para que la alternativa quede totalmente sostenible.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar los impactos ambientales de distintos tipos de paneles solares a partir de la comparación de los materiales utilizados en su fabricación y los componentes tóxicos generados una vez terminada su vida útil.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los materiales y componentes utilizados en la fabricación de distintos tipos de paneles solares fotovoltaicos utilizados actualmente.
- Caracterizar las emisiones de gases tóxicos generados durante la fabricación de un panel solar y aquellos que se generan una vez terminada la vida útil del mismo.
- Analizar el impacto ambiental de la fabricación y disposición final de distintos tipos de paneles solares fotovoltaicos.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

De acuerdo con Chun¹ la energía fotovoltaica consiste en la conversión de la radiación solar en electricidad a través de materiales semiconductores, para ello se utilizan paneles solares formados de un alto número de células solares que contienen un material fotovoltaico. Entre los materiales más utilizados para la fabricación de paneles solares fotovoltaicos, se encuentran el silicio mono cristalino, silicio poli cristalino, silicio amorfo, telurio de cadmio, seleniuro de cobre, indio y galio.

Napan² explica el principio físico detrás de la conversión de la energía solar en electricidad, como una base en la transferencia de la energía solar al electrón más externo de las células fotovoltaicas para que pueda moverse de la banda de valencia a la banda de conducción del material, así generando electricidad. Los materiales semiconductores que conforman los distintos tipos de paneles fotovoltaicos poseen la capacidad de absorber una parte del espectro solar, así el uso combinado de varios materiales permite aprovechar una mayor parte del espectro electromagnético de la radiación solar.

Sampaio³ en la figura 1 se muestra el funcionamiento de una celda solar, en el cual se muestra el movimiento de un electrón desde un material semiconductor cargado negativamente (N-tipo silicón) hasta otro cargado positivamente (P tipo silicón) para producir una corriente. Para inducir el movimiento de electrones muchos tipos de paneles solares poseen una unión entre los materiales cargados negativa y positivamente (Junction PN). El conjunto mencionado y que se observa en la figura 1, se denomina célula solar o célula fotovoltaica. La unión PN es la parte principal de la célula fotovoltaica, con un lado expuesto a la luz solar (material de tipo N) que

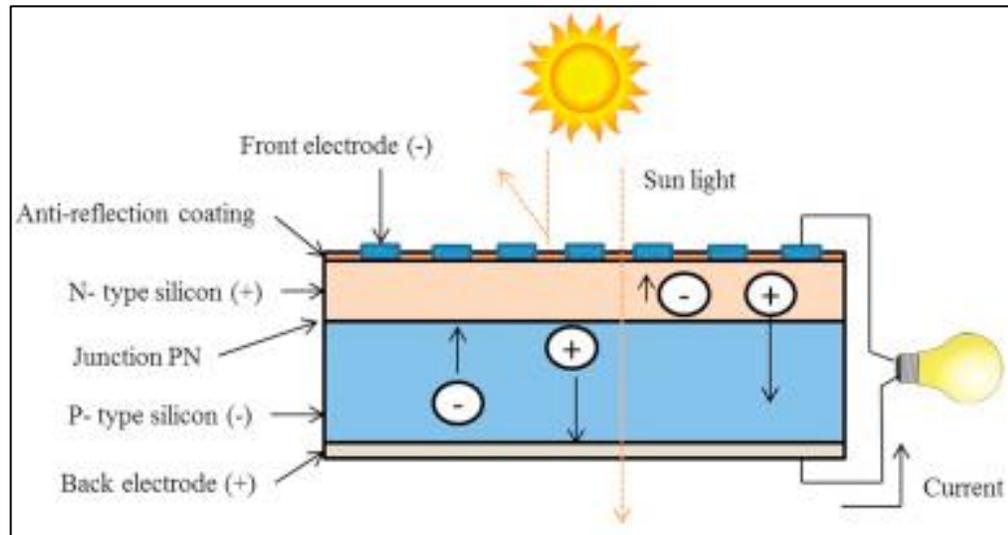
¹ CHU, Yinghao. Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies. [Virtual Pro].2011.P.06.[consultado10,Julio,2017].Disponible en: <http://www.revistavirtualpro.com.ez.uamerica.edu.co/biblioteca/revision-y-comparacion-de-diferentes-tecnologias-de-energia-solar#sthash.CMuyRzRB.dpuf>.

² Napán.Maldonado; Peltzer y Blancá, E.L.. Estudio sobre materiales para la producción de hidrógeno con celdas solares y para su almacenamiento.[Google académico].2013.p.44[Consultado 15, julio, 2017].Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/38058/Documento_completo.pdf?sequence=1

³ SAMPAIO, Priscila y GONZÁLEZ, Mario. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. En: renewable and sustainable energy reviews. [Science Direct].Julio.2017.vol. 74. No.7.P. 592. [Consultado 28, julio, 2017].Disponible en: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S1364032117303076/1-s2.0-S1364032117303076-main.pdf?_tid=140c0fe2-b8e2-11e7-832c-00000aacb361&acdnat=1508866860_7214daa9db55b0d3d844c67d60d35ca

se encarga de captar una porción de luz; por debajo de este material semiconductor cargado negativamente, se encuentra el material de tipo P.

Figura 1. Celda fotovoltaica



Fuente: SAMPAIO, Priscila; GONZÁLEZ, Mario. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. En: renewable and sustainable energy reviews. [Science Direct]. Julio. 2017. vol. 74. No. Edición. 7. P. 592. [Consultado 28, julio, 2017]. Disponible en: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S1364032117303076/1-s2.0-S1364032117303076-main.pdf?_tid=140c0fe2-b8e2-11e7-832c-00000aacb361&acdnat=1508866860_7214daa9db55b0d3d844c67d60d35caa

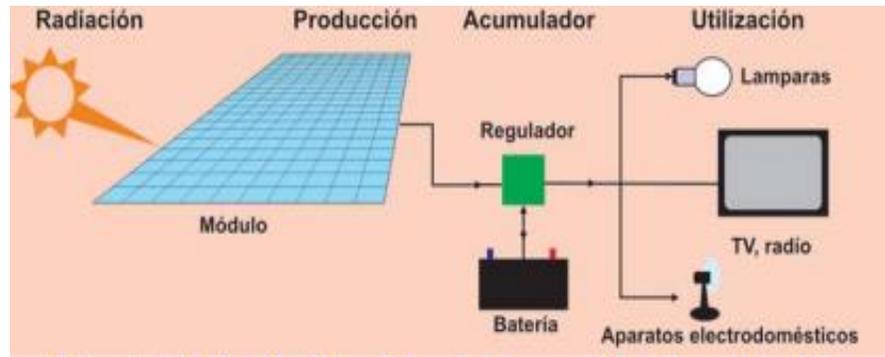
Tal como se ha visto, un sistema fotovoltaico consta de tres partes principales a saber (figuras 2 y 3):

- 1) **Generador solar:** compuesto por un conjunto de paneles fotovoltaicos, que captan la radiación solar y la transforman en corriente continua a baja tensión (12, 24 o 48 V)
- 2) **Acumulador:** Del sol⁴ describe a esta parte como baterías que cumplen dos funciones: proveer potencia a la carga cuando no exista luz solar y amortiguar las variaciones de energía
- 3) **Regulador de carga:** Codeso utiliza estas unidades para evitar sobrecargas o descargas excesivas en el acumulador, lo cual produciría daños en el sistema, y además se utiliza para que el panel siempre trabaje a la máxima eficiencia⁵

⁴ DEL SOL, Nicasio Echarte y CABRERA FERNÁNDEZ, Emilio Ramón. Sistemas Fotovoltaicos. En: revista técnica de la empresa de telecomunicaciones de cuba, s.a. [Ebsco]. vol. 5. No. 1. P. 24-25. [Consultado 28, julio, 2017]. Disponible en: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&sid=c17dff75-962d-4fd4-9317-d19f8260eb5d%40sessionmgr4006>
⁵ Codeso-Reguladores Solares. [Sitio Web]. colombia. Sec. Equipos fotovoltaicos. [Consultado, 06, Agosto, 2017]. Disponible en: <http://www.codeso.com/EqRegulador>

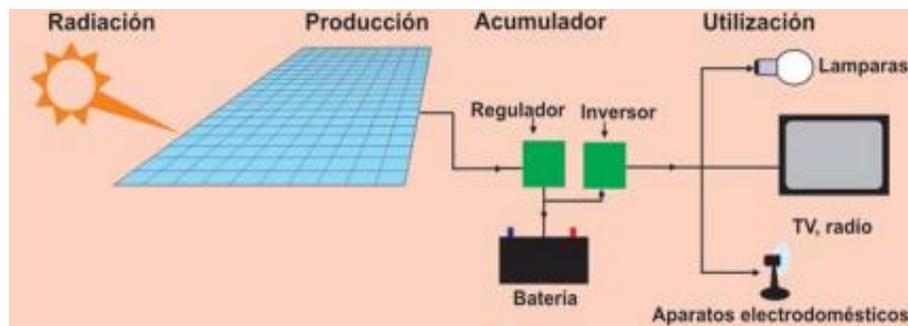
- 4) **Inversor:** Componente opcional en algunos sistemas fotovoltaicos que sirve para transformar la corriente continua en alterna

Figura 2. Instalación solar fotovoltaica sin inversor.



Fuente: DEL SOL, Nicasio Echarte y CABRERA FERNÁNDEZ, Emilio Ramón. Sistemas Fotovoltaicos. En: revista técnica de la empresa de telecomunicaciones de cuba, s.a. [Ebsco]. vol.5.No.1.P. 24-25. [Consultado 28, julio, 2017]. Disponible en: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&sid=c17dff75-962d-4fd4-9317-d19f8260eb5d%40sessionmgr4006>

Figura 3. Instalación solar fotovoltaica con inversor.



Fuente: DEL SOL, Nicasio Echarte y CABRERA FERNÁNDEZ, Emilio Ramón. Sistemas Fotovoltaicos. En: revista técnica de la empresa de telecomunicaciones de cuba, s.a. [Ebsco]. vol.5.No.1.P. 24-25. [Consultado 28, julio, 2017]. Disponible en: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&sid=c17dff75-962d-4fd4-9317-d19f8260eb5d%40sessionmgr4006>

1.1.1 Panel solar de Cd-Te

Para Surek⁶, este tipo de celda solar se utiliza ampliamente para la obtención de energía a un bajo costo y de alta eficiencia. Es importante mencionar las técnicas

⁶ SUREK, Thomas. Crystal Growth and Materials Research in Photovoltaics: Progress and Challenges. En: Journal of cristal growth. [Science Direct]. Colorado. 2005. Vol. 275. P. 275 [Consultado 28, julio, 2017]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.unal.edu.co>

para la fabricación de estos paneles, las cuales pueden ser la sublimación de espacio cerrado (CSS), pulverización, deposición física de vapor de alta velocidad, electrodeposición y crecimiento de solución. Este tipo de células pueden llegar a tener una eficiencia del 16,5%, aunque comercialmente solo alcanzan una eficiencia de máximo el 11%. Para hacer que a nivel comercial los módulos lleguen a tener una eficiencia parecida a los modelos de los laboratorios, se tiene que realizar un control exigente de las propiedades de la película y la ampliación de algunos procesos

1.1.2 Panel solar de Mono Silicio

Como Mendez⁷. lo menciona el semiconductor más utilizado para la fabricación de células fotovoltaicas es de silicio, el cual cuenta con una valencia de tres electrones (Si^{+3}). Para poder establecer un campo eléctrico, en este tipo de material se unen dos regiones de silicio previamente tratadas químicamente haciendo la unión P y N. Para conseguir un semiconductor de silicio de tipo N, se sustituyen algunos átomos de silicio por átomos de fósforo; el mismo procedimiento se le hace al semiconductor de tipo P aunque esta vez el silicio se cambia por boro. Los electrones que han quedado libres del material P ocupan los espacios que dejan en el material N, y viceversa, para así crear un campo eléctrico

En el cuadro 1 se pueden observar las ventajas y desventajas del silicio mono cristalino, como material semiconductor en la elaboración de las células solares.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas del silicio mono cristalino

Celulas de Silicio	
Monocristalino	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta una estructura completamente ordenada • Su comportamiento uniforme lo hace buen conductor • Es de difícil fabricación • Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro • Se reconoce por su monocromía azulada oscura y metálica • Su rendimiento oscila entre 15-18%

Fuente: MENDEZ, Javier y CUERVO, Rafael. Energía Solar Fotovoltaica: Energía solar. [Google Académico]. 2. ed: FC editorial, 2007. P. 28. ISBN 978-849-96743-29-8. [Consultado, 30, Julio, 2017]. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=GZh1DGUQoOUC&oi=fnd&pg=>

⁷ MENDEZ, Javier y CUERVO, Rafael. Energía Solar Fotovoltaica: Energía solar. [Google Académico]. 2. ed: FC editorial, 2007. P. 28. ISBN 978-849-96743-29-8. [Consultado, 30, Julio, 2017]. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=GZh1D>

En el cuadro 2 se muestran algunas propiedades que afectan a los materiales semiconductores, los cuales deben tenerse en cuenta en la fabricación de las células fotovoltaicas.

Cuadro 2. Ventajas y desventajas del silicio mono cristalino

<p align="center">Cristalinidad</p>	<p>Indica la ordenación de los átomos en la estructura cristalina. El silicio, como otros materiales, puede aparecer en varias formas: monocristalino, policristalino o amorfo</p>
<p align="center">Coefficiente de absorción</p>	<p>Indica como la luz lejana, que tiene una longitud de onda específica, puede penetrar el material antes de ser absorbida Un coeficiente de absorción pequeño significa que la luz no es absorbida fácilmente por el material</p> <p>Depende de dos factores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Material que hay encima de la célula; tiene que tener un mínimo coeficiente de absorción • Longitud de onda o energía de la luz que es absorbida. <p>Las células de silicio cristalino son de un espesor grande ya que tienen un coeficiente de absorción de la luz incidente relativamente reducido</p>
<p align="center">Costo y complejidad de fabricación</p>	<p>Varían dependiendo del material o materiales utilizados en las capas del semiconductor según los factores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Deposición en diversos compartimientos • Necesidad de trabajar en un ambiente determinado • Cantidad y tipo de material utilizado • Número de pasos implicados • Necesidad de mover las células

Fuente: MENDEZ, Javier y CUERVO, Rafael. Energía Solar Fotovoltaica: Energía solar. [Google Académico]. 2. ed: FC editorial, 2007. P. 28. ISBN 978-849-96743-29-8. [Consultado, 30, Julio, 2017]. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=GZh1DGUQoOUC&oi=fnd&pg>

1.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

Para entender el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos es importante tener en cuenta dos ángulos los cuales son.

- **Ángulo de azimut solar:** Este ángulo se forma entre el rayo incidente de la radiación solar y la superficie de la tierra, la cual se puede calcular para cualquier momento del día mediante la ecuación 1. Este ángulo sirve para calcular en qué posición caerán los rayos solares, los módulos solares se tienen que elaborar con 2 grados de movilidad para que los rayos incidan en este de forma perpendicular.

Ecuación 1.Calculo del ángulo de azimut

$$\cos(a_s) = \frac{[\sin(\alpha) \times \sin(L) - \sin(\delta)]}{[\cos(\alpha) \times \sin(L)]}$$

Fuente: SUNGUR, Cemil. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey. En: Renewable energy.[Science Direct].Kania.25,agosto,2008.Vol. 34. no. 4, P. 1120. [Consultado,2,Septiembre,2017].Disponible en: <https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S0960148108002656/1-s2.0-S0960148108002656>

Donde L, es la latitud local (°), δ es el ángulo de declinación solar (°) y α es el ángulo de la altura del sol (°)

- **Ángulo de la altura del sol:** Para Sungur⁸ este ángulo se forma entre el plano horizontal de la zona en que se quiere construir el panel o colector y un punto en la superficie de la Tierra. Este ángulo se puede calcular para cada día del año y en cualquier período de tiempo entre la salida y puesta del sol; cuando amanece y atardece el ángulo es 0°, este ángulo permite calcular la cantidad de energía que pueden asimilar las placas y se calcula como se muestra en la ecuación 2

Ecuación 2.Calculo del ángulo de altitud solar

$$\alpha = \text{sen}^{-1}[[\cos(L) \times \cos(\delta) \times \cos(h_s)] + [\sin(L) \times \sin(\delta)]]$$

Fuente: SUNGUR, Cemil. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey. En: Renewable energy.[Science Direct].Kania.25,agosto,2008.Vol. 34. no. 4, P. 1120. [Consultado,2,Septiembre,2017].Disponible en: <https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S0960148108002656/1-s2.0->

⁸ SUNGUR, Cemil. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey. En: Renewable energy.[Science Direct].Kania.25,agosto,2008.Vol. 34. no. 4, P. 1120. [Consultado,2,Septiembre,2017].Disponible en: <https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S0960148108002656/1-s2.0-S0960148108002656>

Donde α es el ángulo solar altitud ($^{\circ}$), L es la latitud local ($^{\circ}$), δ es el ángulo de declinación solar ($^{\circ}$), y h_s es el ángulo horario ($^{\circ}$).

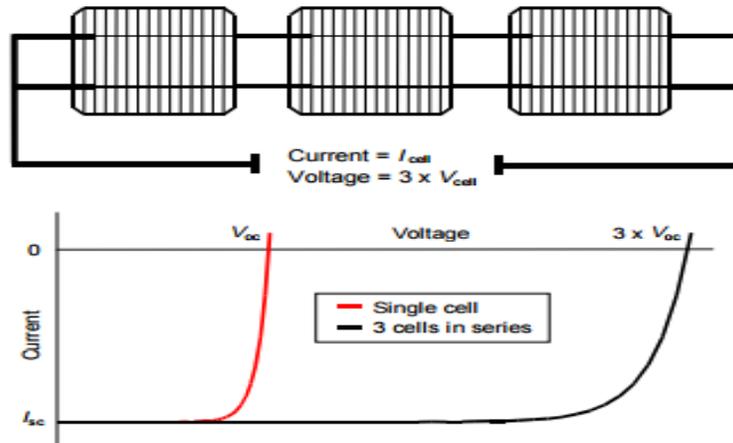
Para Novicki⁹. estos factores son de gran relevancia para la fabricación del panel solar, ya que representan un impacto directo sobre el rendimiento y diseño del mismo, debido a que este recibe la máxima cantidad de energía cuando la radiación solar es exactamente perpendicular a la superficie del módulo, además Hay que tener en cuenta que la mayoría de estos paneles son fijos, para lo cual van acompañados de una tabla de sol para analizar los ángulos solares a lo largo del año, eligiendo el ángulo de fabricación de 15° de latitud resultante del mejor rendimiento, con el fin de maximizar la generación de energía anual

En cuanto a la salida eléctrica de este tipo de panel, hay que tener en cuenta la conexión más conveniente entre las celdas solares, la cual la más utilizada es la conexión en serie. En la figura 4, tres células individuales se encuentran conectadas en serie, lo que se conoce como cadena en serie. La salida de corriente de esta forma de conexión es equivalente a la corriente de una sola celda, sin embargo, Pearsall¹⁰ explica que al unir las células de esta forma se aumenta la salida de voltaje. Para que la eficiencia sea mayor en la unión en serie, hay que tener células parecidas en cuanto a la corriente, debido a que, si una celda tiene una capacidad más baja que las otras, entonces la cadena funcionara a ese nivel inferior, haciendo que las demás células no puedan funcionar a su máxima potencia.

⁹NOWICKI, Mike. PV system fundamentals. En: consulting-specifying engineer.[Ebsco].Agosto.2015.Vol. 52, no. 7.2015.P. 1. [Consultado,3,Septiembre,2017].Disponible en: <http://web.b.ebscohost.com.ez.uamerica.edu.co/ehost/detail/detail?vid=3&sid=179b6e67-bbc4-45bd-844c-8b21e237df98%40pdc>

¹⁰ PEARSALL, Nicola M. y HILL, Robert. Photovoltaic modules, systems and applications. En: clean electricity from photovoltaics.[Google Academico].Abril.2001. Vol.1.2001. P.4-5. [Consultado,9,Septiembre,2017].Disponible en: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/Su2011>

Figura 4. Conexión de células en serie con corriente resultante

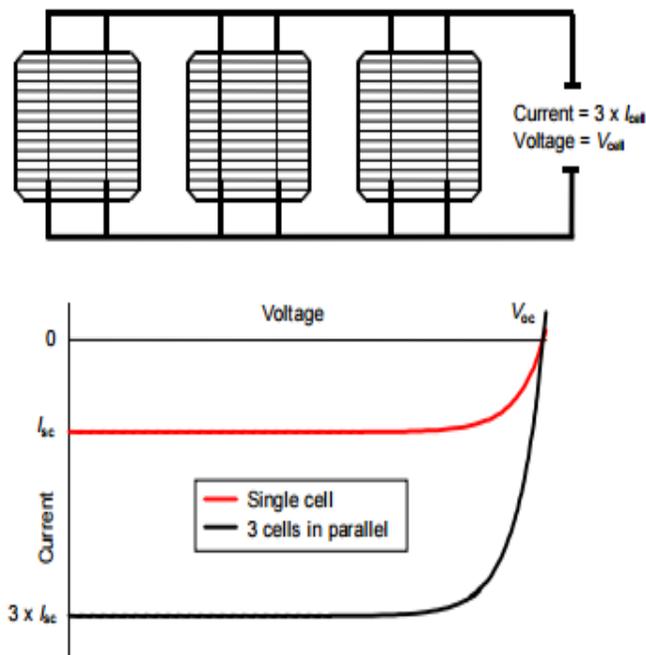


Fuente: PEARSALL, Nicola M. y HILL, Robert. Photovoltaic modules, systems and applications. En: clean electricity from photovoltaics.[Google Academico].Abril.2001. Vol.1.2001. P.4-5. . [Consultado,9,Septiembre,2017].Disponible en: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/Su2011>

En el segundo tipo de conexión, un grupo de células se conectan en paralelo, lo cual da como resultado la adición de la corriente producida por cada celda individual. En este caso, aunque la corriente equivale a la suma de todas las corrientes, el voltaje corresponde al de una celda individual. Según Huimin¹¹ la diferencia de la conexión en serie, y este tipo de conexión, es la tensión debido a que es el parámetro más importante. Igualmente, todas las celdas deben tener el mismo voltaje de funcionamiento. Si la tensión en el punto de máxima potencia es diferente para alguna célula, esto obligará a todas las celdas a operar fuera del punto de su máxima potencia. En la figura 5, se observa la conexión en paralelo de tres células individuales

¹¹ HUIMIN, Yan; ZHIZHI, Zhou y HUAYONG. Lu. Photovoltaic Industry and Market Investigation. En: 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply.[Google Academico].2009. P.2[Consultado,9,Septiembre,2017].Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5348104/?reload=true>

Figura 5. Conexión de células en paralelo, con corriente resultante.



Fuente: PEARSALL, Nicola M. y HILL, Robert. Photovoltaic modules, systems and applications. En: clean electricity from photovoltaics.[Google Academico].Abril.2001. Vol.1.2001. P.4-5. . [Consultado,9,Septiembre,2017].Disponible en: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/Su2011>

En conclusión, son dos tipos de paneles que se pueden conectar en serie o paralelo, la primera de las cuales aumenta el voltaje del sistema mientras que la segunda aumenta la corriente con el voltaje de una sola celda.

1.3 PROBLEMAS AMBIENTALES

Los impactos ambientales ocasionados por los paneles solares se estudian a través del análisis de su ciclo de vida, ya que en cada una de las fases que van desde la fabricación hasta la obtención de energía eléctrica, se pueden identificar tanto impactos positivos como negativos que permiten evaluar las fortalezas y debilidades de la implementación de este tipo de tecnología sostenible frente a otras, incluyendo las convencionales, que permitirá inferir un plan de mejoramiento que se puede realizar para aumentar la sostenibilidad en la implementación de este tipo de tecnología. A continuación, se mencionan los problemas ambientales que puede ocasionar la implementación de un sistema fotovoltaico de generación de electricidad, dependiendo de la capacidad, magnitud y del tipo de tecnología instalada.

1.3.1 Fauna y Hábitat

De acuerdo a Turney¹² el mayor impacto ambiental que pueden tener las instalaciones de paneles fotovoltaicos sobre la fauna y flora es causado por el espacio ocupado en el hábitat de estas especies y por el cercamiento de las locaciones que limitan el libre movimiento de los animales. Los cambios en las condiciones del hábitat, determinado por la fragmentación, limitación y discontinuidad del bosque se potencian por los requerimientos que se deben cumplir para el correcto funcionamiento de los paneles solares. Por ejemplo, en muchas ocasiones se tiene que mantener el lugar sin una altura significativa de vegetación y en algunos casos desprovista de esta, sin omitir que los paneles producen sombras que afectan los microclimas.

1.3.2 Agua

Algunos fabricantes de paneles y celdas solares utilizan el recurso hídrico en muchas etapas del proceso, dentro de los cuales destacan la refrigeración y el control de la contaminación del aire. Para Ecosiglos¹³. el mayor desperdicio de agua se da en la instalación, limpieza y uso, más que todo a escala comercial debido a que para una instalación de 230 a 550 megavatios se pueden requerir hasta 1.500 millones de litros de agua, con el fin de controlar el polvo durante la construcción, además de otros 26 millones de litros de agua para el control de polvo durante su construcción durante el año

1.4 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

El análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta utilizada para la evaluación de las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, mediante, la identificación y cuantificación del uso de materia y energía, como las emisiones al entorno. De esta forma, aplicando el ACV a la construcción de un panel solar, se puede determinar el impacto del uso de recursos y las emisiones y residuos sólidos y líquidos producidos, lo cual es fundamental para evaluar y llevar a la práctica de las estrategias de mejoramiento ambiental.

¹² TURNEY,Damon y FTHENAKIS,Vasilis. Environmental Impacts from the Installation and Operation of Large-Scale Solar Power Plants. En: Renewable and sustainable energy reviews. [Science Direct]. Agosto Vol.15. No.6. 2011. [Consultado 15, septiembre, 2017]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111001675>

¹³ Ecosiglos. La Energía Solar no Es Siempre Tan Verde Como Crees. [Sitio web]. Sec. Búsqueda. [Consultado 02, Octubre, 2017]. Disponible en: <http://www.ecosiglos.com/2014/09/la-energia-solar-no-es-tan-verde-como-crees.html>

Para el Instituto Superior De Medio Ambiente¹⁴ dentro la metodología ACV se realiza el análisis del ciclo completo del ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de extracción y procesamiento de materias primas, producción, transporte y distribución, uso, reutilización y mantenimiento, reciclado, y disposición final.

¹⁴ Instituto Superior De Medio Ambiente-ism-Presentacion.[Sitio Web].Colombia.Sec.Programas formativos.[Consultado 23,Agosto,2017]. Disponible en: <http://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/analisis-del-ciclo-de-vida-conceptos-y-metodologia>

2. METODOLOGIA

En este trabajo se utiliza el análisis del ciclo de vida para identificar los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de los paneles solares. Dentro de este análisis se estudian todos los procesos involucrados en la fabricación y uso de los paneles, desde la adquisición de las materias primas hasta la disposición final de los mismos, pasando por las fases intermedias de manufactura, transporte, instalación y generación de electricidad. A continuación, se presenta la aproximación metodológica que conlleva un inventario de la energía, recursos naturales, materias primas, combustibles, así como los residuos generados en los procesos de producción y los procedentes durante su instalación y uso.

Se considera como documento base para la realización del ACV de los paneles solares, la norma técnica colombiana NTC-ISO 14040 (CITA) que considera los lineamientos para realizar el estudio, junto con la ISO 14041 que define los pasos necesarios para el estudio y presentación del ACV, la ISO 14042 que establece la estructura general para el análisis de los impactos y la ISO 14043 que consolida las recomendaciones para llevar a cabo la interpretación de los resultados.

2.1 IDENTIFICACION DEL INVENTARIO (FLUJO DE ENTRADAS Y SALIDAS)

Para realizar el inventario se procede a identificar las materias primas, insumos y materiales utilizados para la fabricación de cada uno de los tipos de paneles solares considerados. Este inventario se especifica para cada una de las etapas del proceso de fabricación o manufactura que se obtiene a través de la aplicación de la metodología de los flujos de entrada y salidas o eco-balance definido en la ISO 14041. Como resultado se obtendrá un diagrama de flujo de entradas y salidas desde la cuna a la tumba del panel solar en consideración.

Se recurrirá a referencias bibliográficas para la obtención de la información necesaria para realizar el inventario, tanto de las entradas y las salidas del proceso de manufactura de los paneles solares. En las entradas se identifican las materias primas, materiales, insumos, energía, agua, entre los principales, y en las salidas, se contabilizan las emisiones de gases contaminantes, ruido, vertimientos, residuos sólidos,

2.2 IDENTIFICACION DE LOS ASPECTOS AMBIENTALES

A través de una revisión bibliográfica pertinente se identifican los aspectos ambientales inherentes a la fabricación de paneles solares, que se van incorporando a una matriz de identificación de aspectos e impactos ambientales, como el modelo que presenta la ISO 14042. Este modelo es una tabla que relaciona las entradas, el proceso, las salidas y los aspectos ambientales que pueden conllevar un impacto ambiental. La Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá,

presenta los pasos la identificación de los aspectos ambientales de una organización: a) elaborar el diagrama de flujo del proceso; b) identificar las entradas y salidas del proceso; c) identificar los elementos que se requieren para el proceso; d) elaborar el listado de aspectos ambientales; e) identificar los impactos para cada aspecto ambiental; f) priorizar los aspectos e impactos.

3. PROCESOS DE FABRICACION DE LOS PANELES

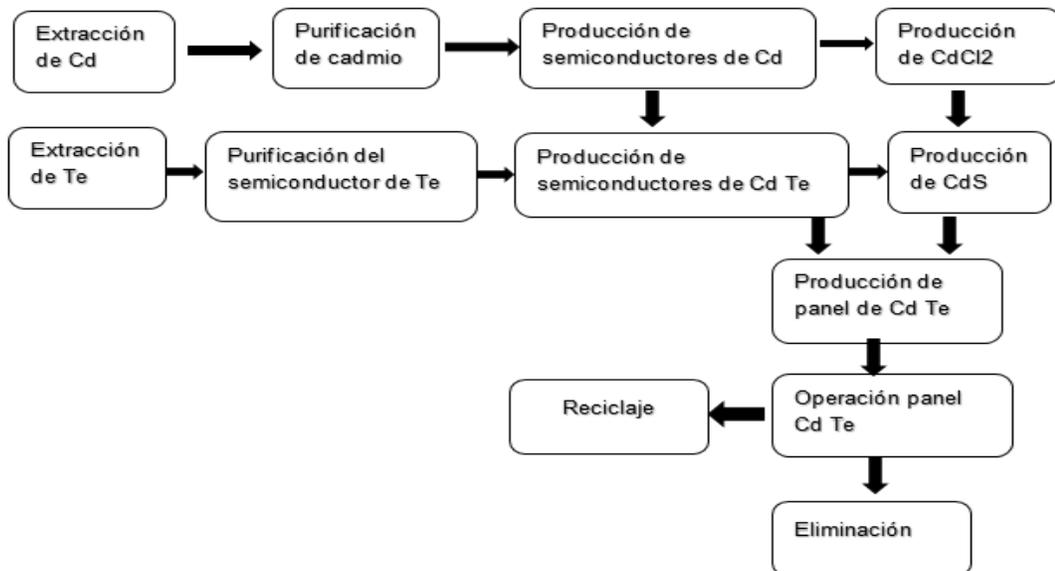
3.1 DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

A continuación, se muestran el ACV para de dos tipos de paneles solares: uno construido con un semiconductor a base de Cd-Te y otro de silicio.

3.1.1 Paneles de Cd-Te

El ACV de este tipo de panel solar se presenta en la figura 6, que muestra los doce procesos involucrados desde la cuna a la tumba del panel. En resumen, los primeros ocho procesos se relacionan con la extracción y producción del Cadmio y el Telurio; y los cuatro últimos se relacionan con la producción del panel, la operación durante su vida, para luego proceder a su eliminación y reciclaje. A continuación, de acuerdo a lo dicho por Vellini se realiza una descripción de cada uno de estos procesos.

Grafica 1. Diagrama de proceso panel Cd-Te



Fuente: VELLINI, Michela; GAMBINI, Marco y PRATTELLA, Valentina. Environmental impacts of pv technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for si-panels and cdte-panels. En: Energy. [Science Direct]. Roma. Noviembre vol.138.2017. P.1105. [Consultado 27, Septiembre, 2017]. Disponible en: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S0360544217312069/1-s2.0-S0360544217312069-main.pdf?_tid=cf869752-b9a4-11e7-8b3d-00000aab0f27&acdnat=1508950496_504cdb9792783ab439cb993ab1715a5a

- **Extracción de Cadmio:** El cadmio se puede encontrar como un subproducto de la fundición de algunos minerales de zinc y plomo y en menor proporción en

el cobre. Cabe resaltar que en la naturaleza, el mayor mineral de cadmio se encuentra en la estructura cristalina de los sulfuros de zinc.¹⁵

- **Purificación de Cadmio:** Como se mencionó anteriormente el cadmio es un subproducto de la refinación del zinc, este proceso se puede realizar mediante un proceso electrolítico cuyo producto final es una esponja de cadmio con una pureza del 99.5% de cadmio puro.¹⁶
- **Producción de semiconductores de Cd:** La esponja resultante del proceso anterior se lleva a un proceso de recuperación de cadmio, el cual se realiza oxidando el cadmio purificado en vapor de agua durante dos días. Como resultado se obtiene un óxido de Cadmio, que es un lixiviado compuesto por un electrolito de cadmio agotado y ácido sulfúrico¹⁷. De esta forma, se produce un electrolito recargado. Durante la extracción electrolítica del cadmio, se utilizan ánodos no corrosivos y aditivos de pegamento animal, con el fin de mejorar la suavidad del cátodo de cadmio resultante que se van retirando cada 24 horas, para luego enjuagarlos y pelarlos, para poder fundirlos en diferentes formas¹⁸.
- **Producción de cloruro de cadmio y sulfuro de cadmio:** El uso principal del semiconductor de cadmio es la producción de semiconductores de Cd-Te, aunque también se puede utilizar para la elaboración de un semiconductor de cloruro de cadmio y este a su vez en la fabricación de semiconductores de sulfuro de cadmio.
- **Extracción y purificación de semiconductores de telurio:** Este metal se puede extraer de los slimes que se forman en el refinado electrolítico del cobre. Para la obtención de un semiconductor de telurio es necesario primero producir un cemento de telurio de cobre.
- **CdTe producción de semiconductores:** Los semiconductores de Cd-Te se producen a partir de cadmio y telurio en polvo¹⁹.
- **Producción de paneles CdTe:** La fabricación de estos módulos fotovoltaicos se divide en tres procesos:

¹⁵ VELLINI, Michela; GAMBINI, Marco y PRATTELLA, Valentina. Environmental impacts of pv technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for si-panels and cdte-panels. En: Energy. [Science Direct]. Roma. Noviembre vol.138.2017. P.1105. [Consultado 27, Septiembre, 2017]. Disponible en: <https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S0360544217312069/1-s2.0-S0360544217312069>

¹⁶ Ibít., p.1105

¹⁷ Ibít., p.1105

¹⁸ Ibít., p.1105

¹⁹ Ibít., p.1106

- **Deposición de semiconductores:** la deposición se realiza en un sustrato de vidrio de óxido de estaño, creando una superficie de contacto transparente y conductora en la cual se depositan el Cd-S y Cd-Te mediante un transporte de vapor; la deposición de estos dos compuestos sobre una fina capa de óxido de estaño fijada en un sustrato de vidrio, crea un contacto transparente y conductor (TCO).
- **Formación de células fotovoltaicas:** las células o celdas solares se interconectan en serie utilizando un láser guía.
- **Ensamblaje de módulos y ensayo:** se realiza un proceso de laminación en el cual se coloca un adhesivo polimérico y una placa de vidrio para posteriormente sellarlo junto con el sustrato de vidrio²⁰.
- **Eliminación:** Una vez el panel solar cumple con su ciclo de vida, se asume un proceso de relleno del panel fotovoltaico.
- **Reciclaje:** De acuerdo con la empresa, First Solar, la tecnología de reciclaje implementada recupera aproximadamente el 90% del peso del módulo, donde la recuperación de Cd y Te puede llegar hasta el 95%. Ambos elementos se envasan colectivamente para su procesamiento posterior y de esta manera poder crear un material semiconductor que puede ser utilizado en nuevos módulos²¹

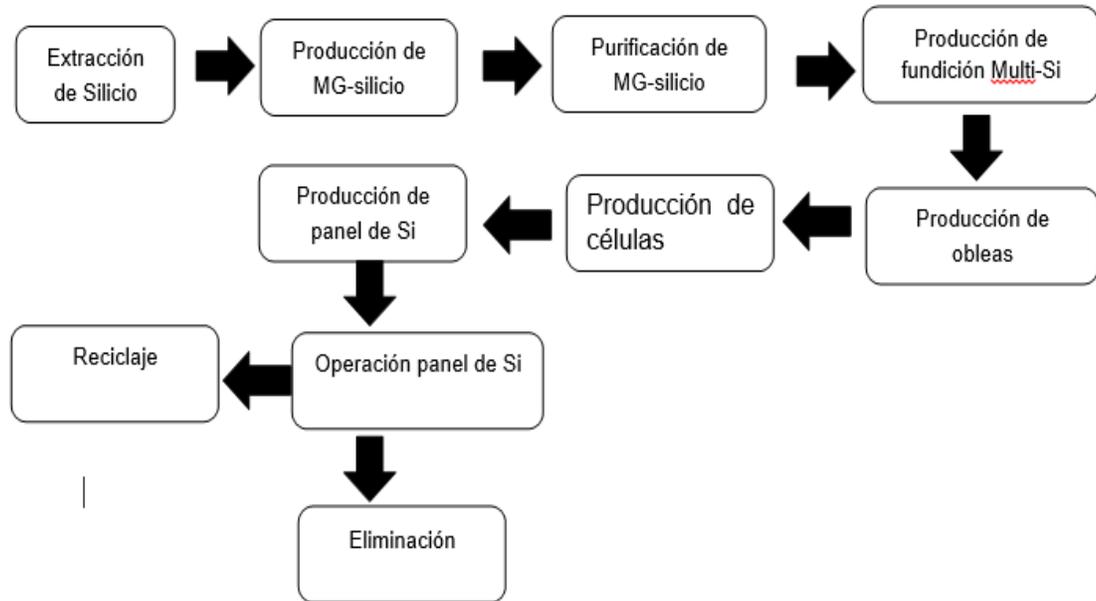
3.1.2 Paneles de silicio

El ACV de este tipo de panel solar se presenta en la figura 7, que muestra los diez procesos involucrados desde la cuna a la tumba del panel. En resumen, los primeros siete procesos se relacionan con la extracción y producción de células de Silicio; y los cuatro últimos se relacionan con la producción y operación de los paneles de Silicio durante su vida, para luego proceder a su eliminación y reciclaje. A continuación, Según lo dicho por Vellini se realiza una descripción de cada uno de estos procesos.

²⁰ Ibít.,p.1106

²¹ Ibít.,p.1107

Grafica 2.Diagrama de proceso panel de Silicio.



Fuente: VELLINI, Michela; GAMBINI, Marco y PRATTELLA, Valentina. Environmental impacts of pv technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for si-panels and cdte-panels. En: Energy.[Science Direct].Roma.Noviembre vol.138.2017.P.1105. [Consultado 27, Septiembre, 2017]. Disponible en: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S0360544217312069/1-s2.0-S0360544217312069-main.pdf?_tid=cf869752-b9a4-11e7-8b3d-00000aab0f27&acdnat=1508950496_504cdb9792783ab439cb993ab1715a5a

- **Extracción de silicio:** La mayoría de células solares producidas en la actualidad usan como materia prima al silicio cristalino, el cual es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y en su forma natural se combina solo con el oxígeno, dióxido de silicio y silicatos.²²
- **Producción de silicio metalúrgico (MG-silicio):** Para producir silicio metalúrgico se requiere una gran cantidad de electricidad, este proceso se realiza en un horno de arco eléctrico en el cual se obtiene como producto silicio metálico por medio de la reacción del cuarzo a una temperatura alta y reduciendo algunos materiales como el carbón. De este proceso algunas salidas son aleación de silicio, humo de sílice condensado y calor residual²³

²² Ibít.,p.1101

²³ Ibít.,p.1101

- **Purificación de silicio metalúrgico (MG-silicio):** Dado el crecimiento que ha tenido los paneles fotovoltaicos de silicio los productores de este desarrollaron una nueva tecnología para la producción de silicio llamada Siemens modificado nombrado así por el reactor de deposición. Una de las ventajas de este proceso consiste en que requiere un menor consumo de energía debido a que la relajada pureza del silicio que es necesaria para los paneles.
- **Producción de fundición Multi-Si:** Según Vellini la composición de la mezcla de los paneles de silicio es de: 80,14% de silicio, grado solar (procedente del proceso modificado de Siemens); 14,61% de silicio, grado electrónico; y 5,25% de silicio, grado electrónico, off-grade²⁴.
- **Producción de obleas:** Para la fabricación de obleas se comienza con un corte de lingotes de silicio por sierras de cinta o sierra de alambre en columnas, a continuación, se coloca en una sierra de varios hilos que las rebanadas en obleas. Estas se limpian utilizando diferentes productos químicos como por ejemplo (KOH o NaOH, ácido clorhídrico, ácido acético, etc.).
- **Producción de células:** Después de un tratamiento químico utilizado para eliminarlas impurezas e imperfecciones estas se someten a un proceso de dopaje con el fin de crear la unión p-n. Una vez finalizado este proceso se realiza una metalización en la parte delantera y trasera con el fin de permitir la conexión eléctrica para posteriormente aplicar un revestimiento anti reflectante con el fin de mejorar la eficiencia ²⁵
- **Producción de paneles:** El panel fotovoltaico está hecho de varias capas entre las que se encuentran:
 - Una cubierta trasera (película de poliéster y fluoruro de polivinilo)
 - Células conectadas en cuerdas utilizando conexiones de cobre y incrustadas en capas de acetato de etil-vinilo (una en la parte delantera y otra en la parte posterior).
 - Cubierta frontal (hoja de vidrio con un bajo contenido de hierro) y marco de aluminio²⁶
- **Eliminación:** Después de cumplir con el ciclo de vida se realiza una eliminación de los componentes del panel que no se pudieron reutilizar

²⁴ Ibít.,p.1102

²⁵ Ibít.,p.1102

²⁶ Ibít.,p.1102

- **Reciclaje:** Para este proceso se consideran las obleas de reciclado reconstruyendo toda la cadena de producción del panel en donde el reciclado de este se compone de dos etapas, la primera es un proceso térmico realizando un desmonte del módulo de forma rápida y económica. La segunda etapa consiste en una recuperación del silicio en polvo mediante el uso de procesos químicos teniendo dos pasos básicos
 - Se Utiliza KOH acuoso al 30%, es posible eliminar los revestimientos metálicos de Al (temperatura: 60 - 80°C, tiempo: 2 - 3 min)
 - Se realiza una mezcla adecuada - 250 ml de HNO₃ (65%), 150 ml de HF (40%), 150 ml de CH₃COOH (99,5%) + 3 ml de Br₂ - es posible eliminar los recubrimientos Ag, revestimientos AR y juntas PN (temperatura 40 ° C, tiempo: 9 s).²⁷

²⁷ Ibít.,p.1103

4. IDENTIFICACION DEL INVENTARIO

4.1 INVENTARIO PARA LOS PANELES

4.1.1 Inventario para el panel de silicio

En la tabla.1 se observa las entradas y salidas definidas por Vellini para cada uno de los procesos comprendidos para los paneles fotovoltaicos de silicio²⁸.

Tabla 1. Entradas y salidas de materiales y energía para todos los procesos de un panel de Silicio

PROCESO	FUENTE DE ENERGIA	ENERGIA MJ	MATERIALES	SALIDA PRINCIPAL	OTRA SALIDA MJ
Producción de MG-silicón	Electricidad 11 kWh Diésel 0,229Galones	Electricidad 39.6 Diésel 23.1	Arena de sílice 2.7 kg Coque de petróleo 0.5 kg Astillas de madera 2.35 kg Carbón 0.17 kg Electrodos de grafito 0.1 kg	MG-silicón 1 KJ	Calor perdido (emisiones) 71.3
Purificación de MG-silicón	Electricidad 223,9 kWh	Electricidad 806	MG-silicon 1 kg Ácido hidroclicórico 3.6kg Agua 43.5 kg Hidróxido de sodio 0.79 kg Hidrógeno 0.1 kg	Grado electrónico del silicio, de grado 0.676 kg	Calor perdido (emisiones) 670
Producción moldeada de multi-Si	Electricidad 19,31 kWh	Electricidad 69.5	Mezcla de producción de silicio 1.14kg Azulejos de cerámica 0.34kg Argón 0.27kg Nitrógeno 0.05kg	Silicio casta multi-Si 1kg	Calor perdido (emisiones) 69.5

²⁸ . Ibít.,p.1103

Producción de obleas	Electricidad 8 kWh Diesel 0,03958 Galones	Electricidad 28.8 Diesel 4	Multi-Si Fundido 1.14kg Agua suavizada 0.49kg Acero 1.48kg trefilado 1.49kg Dipropilenglicol monometil éter 0.3kg	Agua 1m ³	Calor perdido (emisiones) 28.8
Producción celular	Electricidad 30,22 kWh Diésel 0,058Galones	Electricidad 108.8 Diésel 5.9	oblea 1.06 m ³ Agua 1m ³ Nitrógeno líquido 1.85 kg Hidróxido de sodio 0.16 kg	celda 1m ³	Calor perdido (emisiones) 109
Producción de paneles	Electricidad 4,722 kWh Diesel 0,0543 Galones	Electricidad 17 Diesel 5.4	Vidrio templado plano 10.1kg Vidrio solar, hierro bajo 10.1kg aleación de aluminio 2.63kg Acetato de etilvinilacetato 1kg	Panel 1m ²	Calor perdido (emisiones) 17
Proceso de reciclado	Electricidad 21,11 kWh	Electricidad 76	Panel 1m ² Fluoruro de hidrógeno 0.0g78 kg ácido acético5.92kg	889m ²	0

Fuente: VELLINI, Michela; GAMBINI, Marco y PRATTELLA, Valentina. Environmental impacts of pv technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for si-panels and cdte-panels. En: Energy. [Science Direct]. Roma. Noviembre vol.138.2017. P.1105. [Consultado 27, Septiembre, 2017]. Disponible en: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S0360544217312069/1-s2.0-S0360544217312069-main.pdf?_tid=cf869752-b9a4-11e7-8b3d-00000aab0f27&acdnat=1508950496_504cdb9792783ab439cb993ab1715a5a

4.1.2 Inventario paneles de Cd-Te

En la tabla 2 se observa las entradas y salidas de acuerdo con Vellini²⁹ de cada uno de los procesos comprendidos para los paneles fotovoltaicos de Cd-Te

²⁹ Ibít., p.1106

Tabla 2. Entradas y salidas de materiales y energía para todos los procesos de un panel de Cd-Te

PROCESO	FUENTE DE ENERGIA	ENERGIA MJ	MATERIALES	SALIDA PRINCIPAL	OTRA SALIDA MJ
Purificación de cadmio	Electricidad 1,25 kWh	Electricidad 4.5	Lodo de cadmio de electrólisis de zinc 2.24kg ácido sulfúrico 0.036kg	Cadmio primario 1kg	Calor perdido (emisiones) 4.5
Producción de semiconductores-Cd	Electricidad 3,86kWh	Electricidad 13.9	Cadmio primario 1kg	Semiconductor de cadmio 1kg	Calor perdido (emisiones) 13.9
Producción de CdCl₂	Electricidad 0.043 kWh	Electricidad 0.153	Ácido clorhídrico 0.646kg grado cadmio semiconductor 0.419kg	Grado de semiconductor de cloruro de cadmio 1kg	Calor perdido (emisiones) 0.153
Producción de CdS	Electricidad 0.0039 kWh	Electricidad 0.014	Grado de semiconductor de cloruro de cadmio 1.34kg Sulfuro de hidrogeno 0.248kg	CdS1kg	Calor perdido (emisiones) 0.014
Extracción de Te	Electricidad 0.0433 kWh Diesel 13,9 Galones	Electricidad 0.0156 Diesel 0.00533	Cobre 0.00069 kg Oxígeno líquido 0.00176kg Anodod delgado de plata y telurio 0.141kg	Cemento de telurio de cobre 1kg	Calor perdido (emisiones) 0.156
Producción de semiconductor de Te	Electricidad 10,89 kWh	Electricidad 39.2	Cemento de telurio de cobre 2.77kg Agua 16.2kg Ácido sulfurico0.0375kg	Grado de semiconductor de telurio 1kg	Calor perdido (emisiones) 39.2

Producción de semiconductor de Cd-Te	Electricidad 12,44kWh	Electricidad 44.8	Grado de semiconductor de telurio 0.56kg Grado de semiconductor de cadmio 0.493kg	Grado de semiconductor de cadmio-telurio	Calor perdido (emisiones) 0.758
Producción de panel de Cd-Te	Electricidad 58,06 kWh	Electricidad 209	Grado de semiconductor de sulfuro de cadmio 0.0352kg Grado de semiconductor de telururo de cadmio 0.0434kg agua del grifo 219kg Vidrio solar 19.2kg	Panel 1m ²	Calor perdido (emisiones) 209
Proceso de reciclaje	Electricidad 4,39 kWh	Electricidad 15.8	Panel 1m ² Agua 5.4kg Peróxido de hidrogeno 0.57kg Hidróxido de sodio 0.1kg	Cd-Te 0.0412kg	

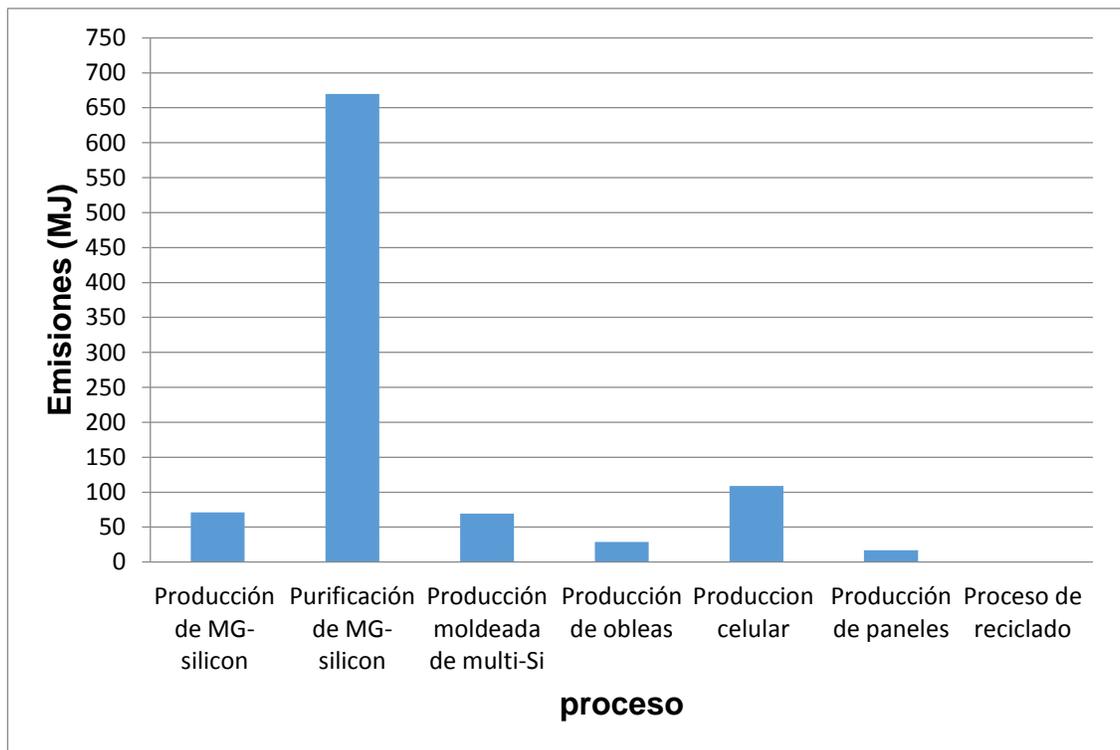
Fuente: VELLINI, Michela; GAMBINI, Marco y PRATTELLA, Valentina. Environmental impacts of pv technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for si-panels and cdte-panels. En: Energy. [Science Direct]. Roma. Noviembre vol.138.2017. P.1105. [Consultado 27, Septiembre, 2017]. Disponible en: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S0360544217312069/1-s2.0-S0360544217312069-main.pdf?_tid=cf869752-b9a4-11e7-8b3d-00000aab0f27&acdnat=1508950496_504cdb9792783ab439cb993ab1715a5a

4.2 COMPARACION DE SALIDAS

De acuerdo a las tablas 1 y 2 el calor perdido total durante la elaboración de los paneles fotovoltaicos de silicio es de 965 MJ mientras que para la producción de los paneles de CdTe solo se emiten 268MJ.

En la gráfica 3 se observa cada uno de los procesos realizados para la construcción de los paneles de silicio con las respectivas emisiones que se realizan en cada uno de ellos cabe resaltar que la etapa que más emisiones produce es la de la purificación del silicio metalúrgico con 675 MJ de calor perdido, mientras que en el reciclaje no se realizan emisiones y en la producción de los paneles solo se liberan 17MJ.

Grafica 3.Emisiones generadas por cada proceso en paneles de Si.

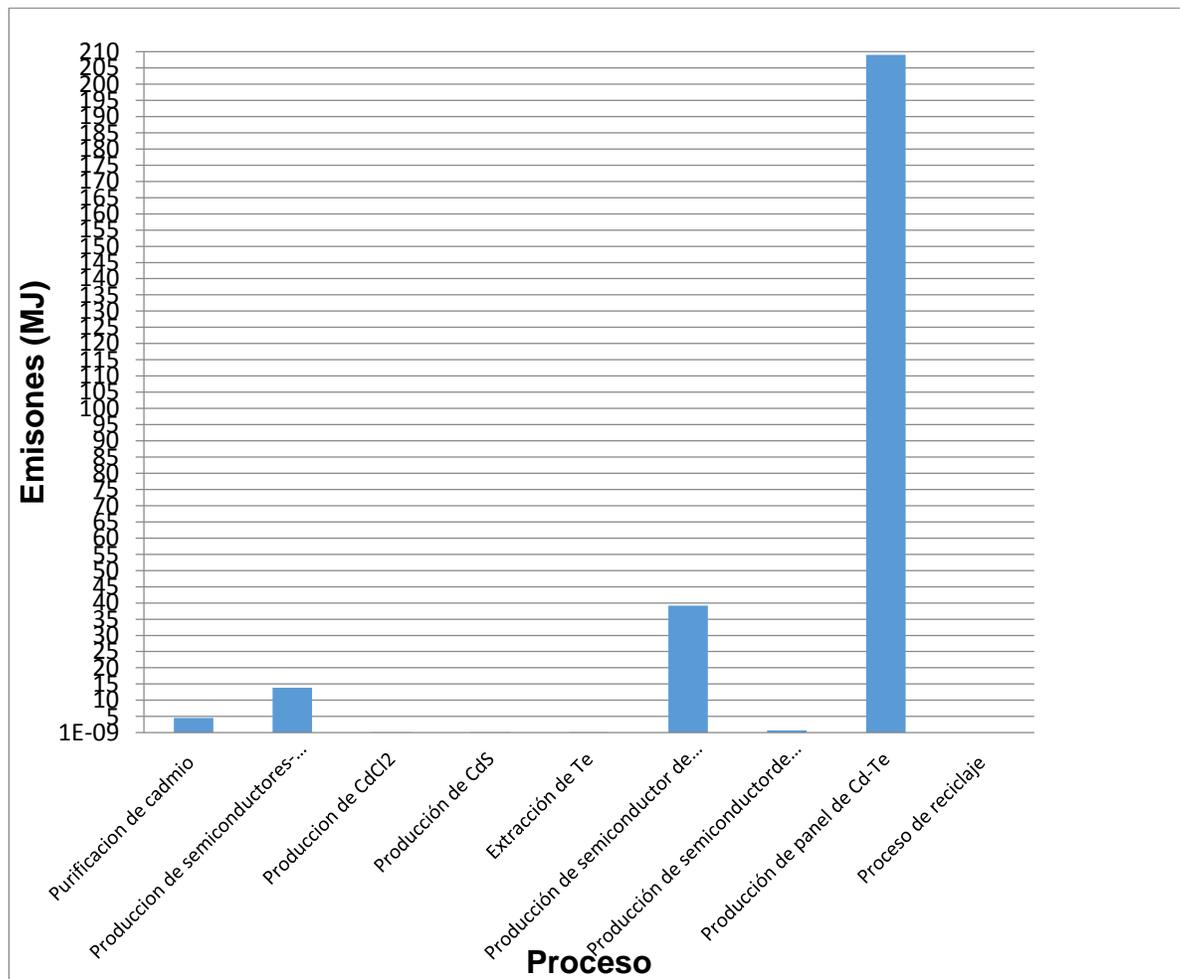


En la gráfica 4 se muestra cada una de las etapas realizadas en la elaboración de los paneles de Cd-Te con sus respectivas emisiones realizadas por cada uno de estos procesos en donde la fase que más emisiones produce es la producción del panel de Cd-Te con 209MJ mientras que la que menos consume es la producción de CdS con 0.014MJ después del reciclado con 0 MJ.

De acuerdo a la figura 6y7 se observa que el proceso con mayor producción de emisiones en los paneles de silicio es la purificación de silicio metalúrgico con 675

MJ mientras que para el panel de Cd-Te el proceso que más calor libera es la producción del panel con 209MJ dando una relación de 1:3.22. mientras que en los procesos que menos contaminan en la construcción de estos paneles es el reciclado con 0 MJ en los dos tipos de paneles siguiéndole la producción de paneles de silicio con 17MJ y la producción de CdS con 0.014MJ dando una relación 1:15, cabe resaltar que mientras en el panel de silicio la producción de estos es la etapa que menos calor libera en el de Cd-Te es la que mayor número de emisiones genera.

Grafica 4. Emisiones generadas por cada proceso en paneles de Cd-Te



5. ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES

Para analizar los impactos ambientales se realizará un cálculo de huella de carbono teniendo en cuenta la fuente de energía que se tiene para cada uno de los procesos de los paneles de silicio y cadmio, en donde esta puede ser electricidad o diésel para poder realizar este método debemos tener claro este concepto:

- **Huella de carbono:** es un indicador ambiental el cual suma todas las emisiones de gases de efecto invernadero generadas de forma directa e indirecta por una persona, organización, producto o evento. Es decir la marca que dejamos en el medio ambiente con cada actividad que genere estos gases³⁰.

5.1 HUELLA DE CARBONO PANEL DE SILICIO

En la tabla 3 se puede observar las emisiones generadas en cada uno de los procesos utilizados en la producción de paneles de Si de acuerdo a la fuente de energía utilizada estos cálculos se realizaron de acuerdo a la calculadora de la unidad de planeación minero energética (UPME)³¹.

Tabla 3.Fuentes de energía en cada proceso de los paneles de Silicio.

Proceso	Fuente de energía	Emisiones generadas en kgCO ₂ (no equivalentes)
Producción de MG-silicón	11 kWh	2,189
	60226 Galones de diesel	2,32
Purificación de MG-silicón	309,2 kWh	44,38
Producción moldeada de multi-Si	19,31 kWh	3,84

³⁰ Clima y Sector Agropecuario.[Sitio Web].Colombia.Sec.Home.[Consultado 4,Octubre,2017]. Disponible en: <http://www.aclimatecolombia.org/huella-de-carbono/>

³¹ Unidad de Planeacion Minero Energetico-UPME-Liquidos.Diesel B2.[Sitio Web].Colombia.Sec.Inicio.[Consultado 1,Octubre,2017].Disponible en: http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html

Proceso	Fuente de energía	Emisiones generadas en kgCO₂ (no equivalentes)
Producción de obleas	8 kWh	1,592
	10429 Galones de diesel	0,3958
Producción celular	30,22 kWh	6,014
	15382 Galones de diesel	0,588
Producción de paneles	4,722 kWh	0,939
	14079 Galones de diesel	0,543
Proceso de reciclado	21,11 kWh	4,2
TOTAL DE EMISIONES GENERADAS EN LA FABRICACION DE PANELES DE SILICIO		65,0766

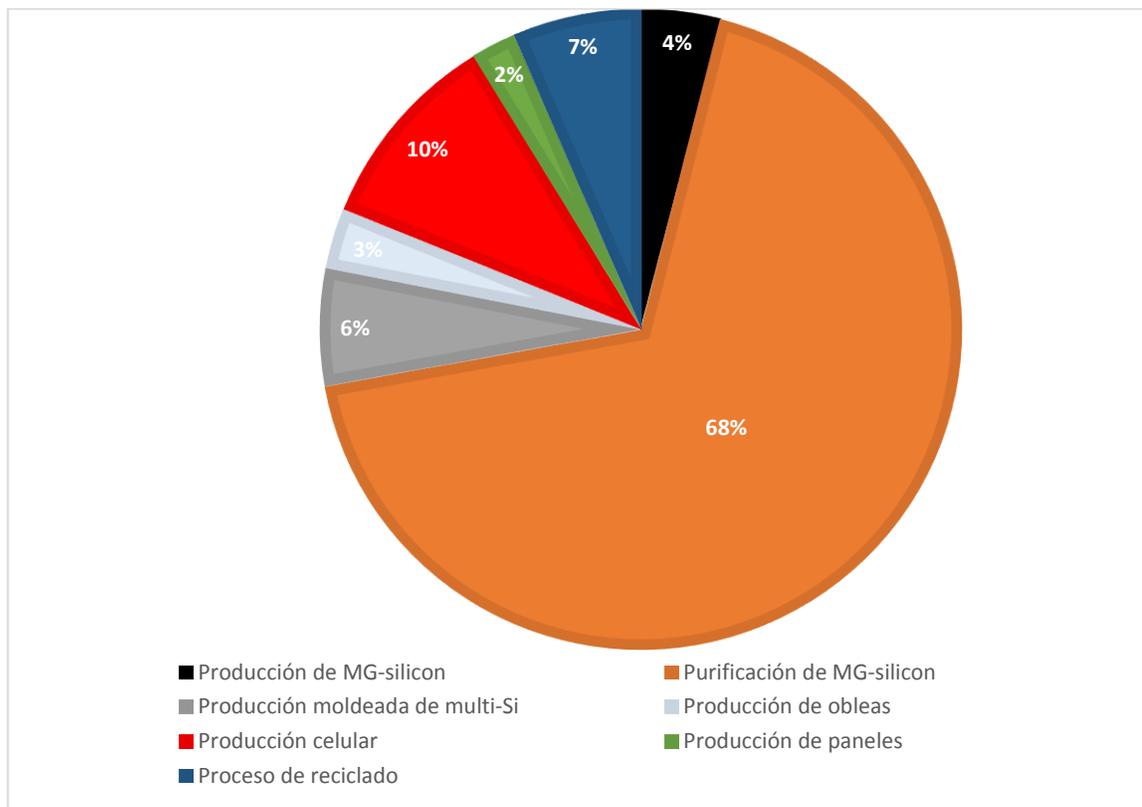
En la tabla número 3 se muestran cada uno de los procesos con cada una de sus fuentes de energía que pueden ser medidos en kWh y galones de diésel obteniendo como resultado las emisiones que genera cada uno de estos al medio ambiente, en donde el proceso que más consume energía y por ende mayor contaminación genera es la purificación de MG-silicón con 309,2 kwh, por otro lado la etapa con más consumo de diésel es la producción celular con 15382 galones de diésel aunque su huella de carbono solo es de 0,588 kgCO₂.

Tabla 4.Emisiones generadas en kgCO₂ para cada uno de los procesos del panel de silicio

Proceso	Emisiones generadas en kgCO₂ (no equivalentes)
Producción de MG-silicón	2,5848
Purificación de MG-silicón	44,38
Producción moldeada de multi-Si	3,84
Producción de obleas	1,9878
Producción celular	6,602
Producción de paneles	1,482
Proceso de reciclado	4,2
TOTAL DE EMISIONES GENERADAS EN LA FABRICACION DE PANELES DE SILICIO	65,0766

En la tabla número 4 se condensa la información recopilada en la tabla anterior teniendo como resultado las emisiones totales generadas en cada uno de los procesos del ciclo de vida de los paneles de Silicio con un total de 65,076kgCO₂ de las cuales 44,38 kg CO₂ son aportadas por la purificación de MG-silicón

Grafica 5. Porcentaje de cada uno de los procesos en la huella de carbono para el panel de silicio



En la gráfica 5 se observa el porcentaje de emisiones de las 65,0766 kgCO₂ que aporta cada uno de los procesos teniendo con un 68% a la purificación de MG-silicón, un 10% la producción celular, el proceso de reciclado con un 7%, 6% la producción moldeada de multi-Si, mientras que la producción de obleas y paneles apenas aportan un 3 y 2% respectivamente

5.2 HUELLA DE CARBONO PANEL DE Cd-Te

En la tabla 5 se observan las emisiones generadas en cada uno de los procesos utilizados para la producción de paneles de Cd-Te de acuerdo a la fuente de energía utilizada estos cálculos se realizaron de acuerdo a la calculadora de la unidad de planeación minero energética (UPME)³².

³² Unidad de Planeación Minero Energética-UPME-Electricidad.2015.[Sitio Web].Colombia.Sec.Inicio.[Consultado 1, Octubre, 2017]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html

Tabla 5.Fuentes de energía en cada proceso de los paneles de Cd-Te

PROCESO	Fuente de energía	Emisiones generadas en kgCO₂ (no equivalentes)
Purificación de cadmio	1,25 kWh	0,248
Producción de semiconductores-Cd	3,861 kWh	0,768
Producción de CdCl₂	0,0425 kWh	0,00846
Producción de CdS	0,00389 kWh	0,00077
Extracción de Te	0,00433 kWh	0,0086
	0,000053 Galones	0,0005
Producción de semiconductor de Te	10,89 kWh	2,17
Producción de semiconductor de Cd-Te	12,44 kWh	2,48
Producción de panel de Cd-Te	58,06 kWh	11,55
Proceso de reciclaje	4,389 kWh	0,873
TOTAL DE EMISIONES GENERADAS EN LA FABRICACION DE PANELES DE Cd-Te		18,10733

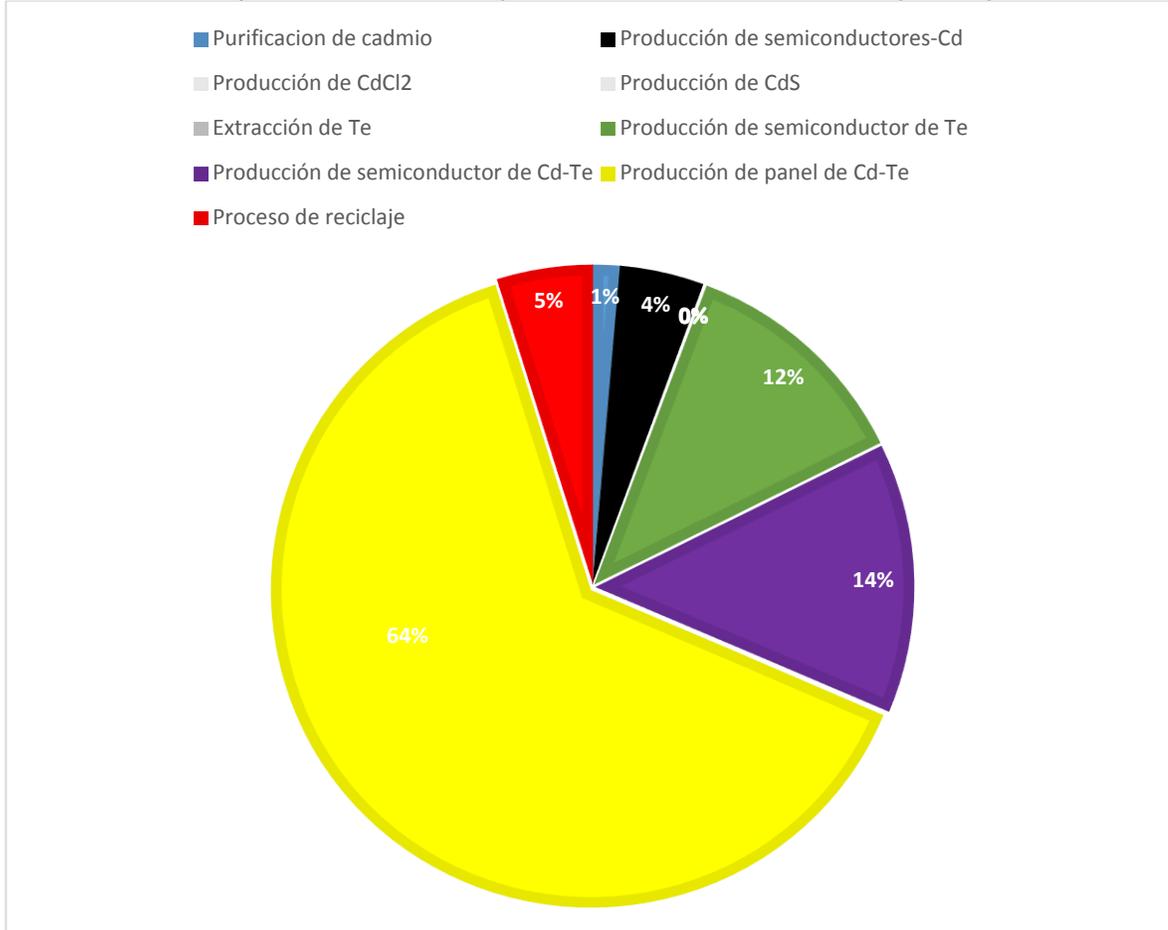
En la tabla número 5 se muestran cada uno de los procesos con cada una de sus fuentes de energía que pueden ser medidos en kWh y galones de diésel obteniendo como resultado las emisiones que genera cada uno de estos al medio ambiente, en donde el proceso que más consume energía y por ende mayor contaminación genera es la producción de panel de Cd-Te con 58,06 kWh , por otro lado la única etapa que consume diésel es la extracción de Te con 0,000053 galones de diésel aunque su huella de carbono solo es de 0,588 kgCO₂.

Tabla 6.Emisiones generadas en kgCO₂ para cada uno de los procesos del panel de Cd-Te.

Proceso	Emisiones generadas en kgCO₂ (no equivalentes)
Purificación de cadmio	0,248
Producción de semiconductores-Cd	0,768
Producción de CdCl₂	0,00846
Producción de CdS	0,00077
Extracción de Te	0,0091
Producción de semiconductor de Te	2,17
Producción de semiconductor de Cd-Te	2,48
Producción de panel de Cd-Te	11,55
Proceso de reciclaje	0,873
TOTAL DE EMISIONES GENERADAS EN LA FABRICACION DE PANELES DE Cd-Te	18,10733

En la tabla número 6 se condensa la información recopilada en la tabla anterior teniendo como resultado las emisiones totales generadas en cada uno de los procesos del ciclo de vida de los paneles de Silicio con un total de 18,10733kgCO₂ de las cuales 11,55 kg CO₂ son aportadas por la purificación de producción de panel de Cd-Te

Grafica 6. Porcentaje de cada uno de los procesos en la huella de carbono para el panel de Cd-Te



En la gráfica 6 se observa el porcentaje de emisiones de las 18,10733 kgCO₂ que aporta cada uno de los procesos teniendo con un 64% producción de panel de Cd-Te, un 14% producción de semiconductor de Cd-Te, producción de semiconductor de Cd-Te con un 12%,5% el proceso de reciclaje, mientras que la producción de semiconductores de Cd y la purificación de cadmio apenas aportan un 4 y 1% respectivamente; los kgCO₂ que aportan las etapas de la producción de CdCl₂, extracción de Te y producción de CdS son relativamente insignificantes debido a que no superan el 0%

6. CONCLUSIONES

- Se apreció que la energía solar que algunas veces se conoce como limpia o amigable con el medio ambiente, y algunas veces se piensa que producen cero contaminaciones también tienen su impacto negativo durante su proceso de elaboración y posterior eliminación, debido a que generan algunos contaminantes y emisiones a la atmósfera que pueden llegar a ser perjudiciales para los seres humanos, sin embargo, esta tecnología contamina en menor proporción que los combustibles convencionales.
- Por otra parte se evidenció que los procesos que más emisiones generan hacia el medio ambiente son la producción del panel de Cd-Te con 209 MJ para el panel de Cd-Te lo que representa el 78,08% del total de emisiones producidas por todos los procesos de este panel, para el caso del panel de silicio la etapa que más emisiones produce es la purificación de MG-silicón con 670 MJ representando un 69,37% de las emisiones totales generadas por este tipo de panel, cabe resaltar que la purificación de MG-silicón produce 3.2 veces más emisiones que la producción del panel de Cd-Te.
- Se realizó el cálculo de la huella de carbono expresada en kgCO_2 no equivalentes para cada uno de los paneles obteniendo como resultado que la producción de panel de Cd-Te produce más emisiones con 11,65 kgCO_2 no equivalente lo que representa un 64% de kgCO_2 no equivalentes emitidos por todos los procesos del panel de Cd-Te siendo el total de estos de 18,10 kgCO_2 , mientras para el panel de silicio el total de kgCO_2 no equivalentes es de 65,08 kgCO_2 no equivalentes siendo el proceso más contaminante la purificación de MG-silicón con 44,38 kgCO_2 no equivalentes, es importante resaltar que el panel de silicio genera 5,59 kgCO_2 no equivalentes más que el panel de Cd-Te es decir el proceso de producción del panel de silicio produce mayor contaminación que el de Cd-Te.

7. RECOMENDACIONES

- Colombia al ser un país ubicado en la línea del ecuador cuenta con una gran ventaja debido a que durante todo el año se lograra contar con un alto nivel de radiación solar y por lo tanto poder tener una mayor eficiencia para los paneles en comparación a los diferentes países que no se encuentran ubicados en la línea del ecuador
- Las energías renovables siendo bien utilizadas pueden llegar a ser parte de la solución del cambio climático que se está evidenciando debido al mal cuidado que hemos tenido de la naturaleza durante toda nuestra existencia y al uso indiscriminado de combustibles fósiles.
- Se debe realizar un mayor control en cuanto a la fabricación y disposición final de los paneles de Silicio y Cd-Te debido a que lo bueno que se realiza por medio de la energía se opaca un poco a la contaminación que se produce durante todos los procesos productivos que llevan la producción y eliminación de los paneles

BIBLIOGRAFÍA

CHU, Yinghao. Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies. [Virtual Pro].2011.P.06.[consultado 10, Julio, 2017]. Disponible en: <http://www.revistavirtualpro.com.ez.uamerica.edu.co/biblioteca/revision-y-comparacion-de-diferentes-tecnologias-de-energia-solar#sthash.CMuyRzRB.dpuf>.

Clima y Sector Agropecuario.[Sitio Web].Colombia.Sec.Home.[Consultado 4, Octubre, 2017]. Disponible en: <http://www.aclimatecolombia.org/huella-de-carbono/>

DEL SOL, Nicasio Echarte y CABRERA FERNÁNDEZ, Emilio Ramón. Sistemas Fotovoltaicos. En: revista técnica de la empresa de telecomunicaciones de cuba, s.a.[Ebsco].vol.5.No.1.P. 24-25. [Consultado 28, julio, 2017]. Disponible en: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=4&sid=c17dff75-962d-4fd4-9317-d19f8260eb5d%40sessionmgr4006>

Ecosiglos. La Energía Solar no Es Siempre Tan Verde Como Crees. [Sitio web]. Sec. Búsqueda. [Consultado 02, Octubre, 2017]. Disponible en: <http://www.ecosiglos.com/2014/09/la-energia-solar-no-es-tan-verde-como-crees.html>

HUIMIN, Yan; ZHIZHI, Zhou y HUAYONG. Lu. Photovoltaic Industry and Market Investigation. En: 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply.[Google Academico].2009. P.2[Consultado, 9, Septiembre, 2017]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5348104/?reload=true>

Instituto Superior De Medio Ambiente-ism-Presentacion.[Sitio Web].Colombia.Sec.Programas formativos.[Consultado 23, Agosto, 2017]. Disponible en: <http://www.ismedioambiente.com/programas-formativos/analisis-del-ciclo-de-vida-conceptos-y-metodologia>

MENDEZ, Javier y CUERVO, Rafael. Energía Solar Fotovoltaica: Energía solar.[Google Academico]. 2.ed:FC editorial, 2007.P. 28. ISBN 978-849-96743-29-8.[Consultado, 30, Julio, 2017]. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=GZh1DGUQoOUC&oi=fnd&pg>

NOWICKI, Mike. PV system fundamentals. En: consulting-specifying engineer.[Ebsco]. Agosto. 2015. Vol. 52, no. 7. 2015. P. 1. [Consultado, 3, Septiembre, 2017]. Disponible en: <http://web.b.ebscohost.com.ez.uamerica.edu.co/ehost/detail/detail?vid=3&sid=179b6e67-bbc4-45bd-844c-8b21e237df98%40pdc>

Napán. Maldonado; Peltzer y Blancá, E.L.. Estudio sobre materiales para la producción de hidrógeno con celdas solares y para su almacenamiento.[Google académico].2013.p.44[Consultado 15, julio, 2017].Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/38058/Documento_completo.pdf?sequence=1

PEARSALL, Nicola M. y HILL, Robert. Photovoltaic modules, systems and applications. En: clean electricity from photovoltaics.[Google Académico].Abril.2001. Vol.1.2001. P.4-5. [Consultado,9,Septiembre,2017].Disponible en: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/Su2011>

SAMPAIO, Priscila y GONZÁLEZ, Mario. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. En: renewable and sustainable energy reviews. [Science Direct].Julio.2017.vol. 74. No.Edición.7.P. 592. [Consultado 28, julio, 2017].Disponible en: https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S1364032117303076/1-s2.0-S1364032117303076-main.pdf?_tid=140c0fe2-b8e2-11e7-832c-00000aacb361&acdnat=1508866860_7214daa9db55b0d3d844c67d60d35caa

SUNGUR, Cemil. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey. En: Renewable energy.[Science Direct].Kania.25,agosto,2008.Vol. 34. no. 4, P. 1120. [Consultado,2,Septiembre,2017].Disponible en: <https://ac-els-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S0960148108002656/1-s2.0-S0960148108002656>

SUREK,Thomas. Crystal Growth and Materials Research in Photovoltaics: Progress and Challenges.En:Journal of cristal growth.[Science Direct].Colorado.2005.Vol.275.P.275 [Consultado 28, julio, 2017].Disponible en: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.unal.edu.co>

TURNEY,Damon y FTHENAKIS,Vasilis. Environmental Impacts from the Installation and Operation of Large-Scale Solar Power Plants. En: Renewable and sustainable energy reviews. [Science Direct]. Agosto Vol.15. No.6. 2011. [Consultado 15, Septiembre, 2017]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111001675>

Unidad de Planeacion Minero Energetico-UPME-Liquidos.Diesel B2.[Sitio Web].Colombia.Sec.Inicio.[Consultado 1,Octubre,2017].Disponible en: http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html

Unidad de Planeacion Minero Energetico-UPME-Electricidad.2015.[Sitio Web].Colombia.Sec.Inicio.[Consultado 1,Octubre,2017].Disponible en: http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html

VELLINI, Michela; GAMBINI, Marco y PRATTELLA, Valentina. Environmental impacts of pv technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for si-panels and cdte-panels. En: Energy.[Science Direct]. Roma. Noviembre vol.138.2017.P.1105. .[Consultado 27, Septiembre, 2017]. Disponible en: https://acels-cdn-com.ezproxy.unal.edu.co/S0360544217312069/1-s2.0-S0360544217312069-main.pdf?_tid=cf869752-b9a4-11e7-8b3d-0000aab0f27&acdnat=1508950496_504cdb9792783ab439cb993ab1715a5a