



## Trabajo Fin de Máster

Análisis del ciclo de vida de un calentador solar  
con sistema de almacenamiento térmico  
con cambio de fase

*Life cycle assessment of a solar collector with phase  
change material as thermal storage system*

Autor

Joanna Zwolińska

Director

Sergio Usón Gil

Codirector

Alejandro Zaleta Aguilar

Universidad de Guanajuato, México

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2017



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dª. Joanna Zwolinska

con nº de DNI Y2622679A en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Máster (Título del Trabajo)

"Análisis del ciclo de vida de un calentador solar con sistema de

almacenamiento térmico con cambio de fase"

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 de marzo de 2017

*Joanna Zwolinska*

Fdo: Joanna Zwolinska

## AGRADECIMIENTOS

A la Red SUMAS (Proyecto CONACYT No. 271624)  
por las facilidades para el uso del software *SimaPro*.

# **Análisis del ciclo de vida de un calentador solar con sistema de almacenamiento térmico con cambio de fase**

## **RESUMEN**

El estudio realizado consiste en el análisis del ciclo de vida de un calentador solar con sistema de almacenamiento térmico con cambio de fase. Se elabora el objetivo y alcance de análisis, con el inventario, evaluación de impacto e interpretación de los resultados. En el estudio se distinguen las etapas de la producción, distribución, uso y fin de vida, contemplando los procesos de transporte. El análisis se lleva a cabo en el software *SimaPro* usando el método CML-IA baseline. Gracias a esto se obtiene la información sobre los impactos medioambientales para poder recomendar los posibles cambios en la fase del diseño del producto. Además, los resultados de gases de efecto invernadero son comparados con los datos del gas LP usado en un calentador convencional para reflejar la ventaja de sustituir esta tecnología por el uso de energía solar. Los gases de efecto invernadero producidos por el sistema son igual a 532,8 kg CO<sub>2</sub> eq. Usando la instalación de la tecnología renovable se consigue ahorrar el combustible fósil. Durante la vida útil del colector solar se puede evitar el consumo de 6 355,64 kg de gas LP, que es igual a 18 812,69 kg CO<sub>2</sub> eq emitidos.

# Índice

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.   | Introducción .....  | 7  |
| 1.1. | Desarrollo sostenible .....                                   | 7  |
| 1.2. | Objetivo .....  | 9  |
| 2.   | Análisis del ciclo de vida.....                               | 10 |
| 3.   | Objetivo del análisis del ciclo de vida .....                 | 12 |
| 4.   | Alcance del estudio .....                                     | 13 |
| 4.1. | Colector solar SATCF 3.0.....                                 | 13 |
| 4.2. | Descripción del sistema .....                                 | 16 |
| 4.3. | Unidad funcional.....   | 17 |
| 4.4. | Límites del sistema .....                                     | 20 |
| 4.5. | Metodología y categorías de impacto .....                     | 21 |
| 4.6. | Suposiciones y requisitos de calidad de datos .....           | 21 |
| 5.   | Inventario del ciclo de vida .....                            | 22 |
| 5.1. | Materiales.....   | 22 |
| 5.2. | Producción .....  | 30 |
| 5.3. | Distribución.....   | 34 |
| 5.4. | Uso .....   | 34 |
| 5.5. | Fin de vida.....  | 35 |
| 5.6. | Transporte .....  | 35 |
| 6.   | Evaluación del impacto del ciclo de vida .....                | 38 |
| 6.1. | Evaluación del impacto del escenario base.....                | 39 |
| 6.2. | Ánálisis de escenarios.....                                   | 46 |
| 6.3. | Verificación del análisis de integridad y de coherencia ..... | 49 |
| 7.   | Interpretación del estudio .....                              | 50 |
| 7.1. | Interpretación de la evaluación del impacto.....              | 50 |
| 7.2. | Ahorro de combustible fósil .....                             | 51 |
| 7.3. | Tiempo de retorno de emisiones .....                          | 52 |
| 7.4. | Tiempo de retorno de energía .....                            | 54 |
| 8.   | Conclusiones .....  | 56 |

|  |    |
|--|----|
| Anexo A .....                              | 57 |
| A.1. Fases del ACV .....                   | 57 |
| A.2. Alcance del ACV .....                 | 59 |
| Anexo B.....                               | 61 |
| B.1. Metodología de estudio .....          | 61 |
| B.2. Métodos de evaluación de impacto..... | 61 |
| Bibliografía .....                         | 66 |

# 1. Introducción

## 1.1. Desarrollo sostenible

La filosofía del desarrollo sostenible ya juega un papel importante en el Planeta. En los distintos países se investigan soluciones para un mundo más sostenible, con menos emisiones contaminantes y la capacidad de adaptación a un clima más extremo. Gracias a estos pensamientos cada vez se crean nuevas leyes para poder proteger el medioambiente y los ecosistemas donde vive el ser humano.

Hace menos de dos años, el 12 de diciembre de 2015, en Francia se aprobó el Acuerdo de París sobre el cambio climático. Lo ratificaron 196 Partes durante la Convención Marco sobre el Cambio Climático (COP21) de las Naciones Unidas. El acuerdo entrará en vigor en el 2020 y es uno de los pasos para poder cumplir con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. La Agenda 2030 fue aprobada en Nueva York el 25 de septiembre de 2015 y trata de los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible [1], que unen todos los aspectos, tanto ambientales, como sociales y económicos. Algunos de ellos tratan abiertamente los problemas del cambio climático, de sustentabilidad y de promoción de la energía verde [2].

México es uno de los países que firmó el Acuerdo de París. Siendo un país que por sus características geográficas puede recibir afectaciones importantes derivadas del cambio climático, se han tomado diversas medidas para prevenir futuros daños. En el mapa de abajo (Figura 1) se marca el grado de vulnerabilidad al cambio climático en las diferentes regiones. Los estados del sur serán más afectados (Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Veracruz).

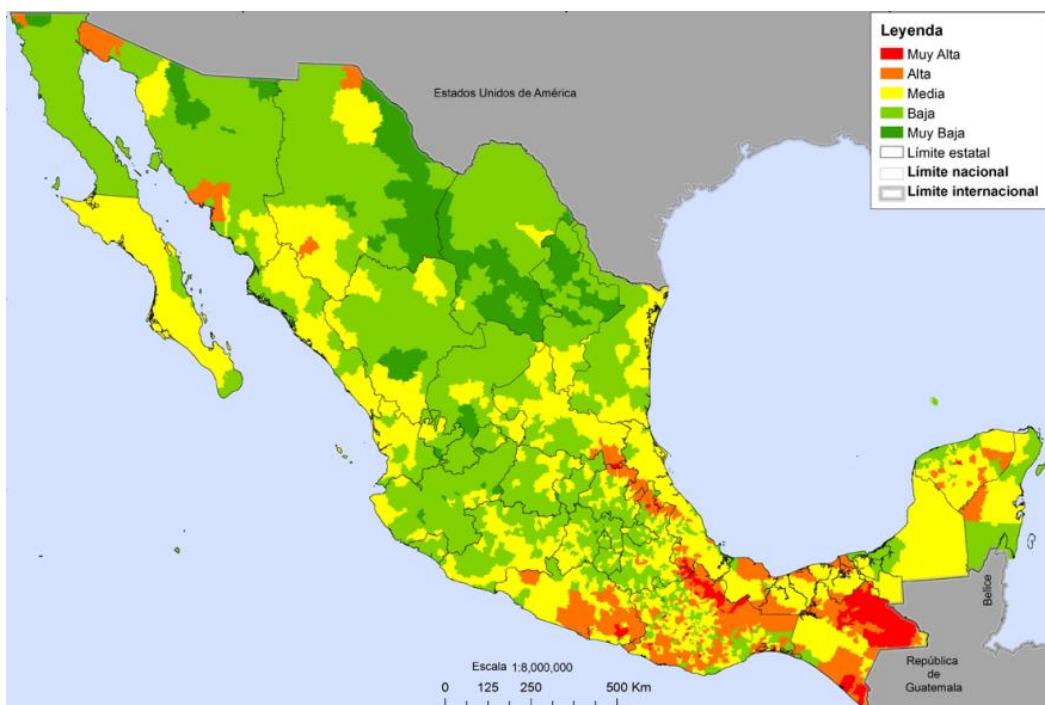


Figura 1. Mapa de grado de vulnerabilidad al cambio climático en México  
(Fuente: INECC Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2013 [3])

Para cumplir con los objetivos del acuerdo al 2030 en el sector urbano, México fija las siguientes medidas: dar más importancia a la edificación y las ciudades sustentables, promover el uso doméstico de colectores solares y paneles fotovoltaicos, recuperar y usar el metano en rellenos sanitarios municipales y plantas de tratamiento de aguas residuales [3].

Para estos cambios de optimización de recursos, las herramientas de evaluación de los impactos medioambientales poseen un papel muy importante. Una de estas herramientas es el análisis de ciclo de vida, el cual califica los daños en la salud humana, ecosistemas y agotamiento de recursos naturales, que trae un producto o un servicio generado por el ser humano.

De acuerdo con el estudio de consumo energético del año 2015 representado abajo (Figura 2), se observa que en México el combustible más usado son gasolina y naftas (casi 30%). La energía solar se coloca en último lugar, con el porcentaje total de 0,19% [4], dando al uso de las energías verdes muy poca importancia. La energía solar contribuye a la eliminación de los cambios que genera el hombre en el medioambiente. Los colectores solares domésticos para agua sanitaria pueden disminuir el consumo de recursos abióticos fósiles y así dejar de emitir gases de efecto invernadero.

De acuerdo con estudios recientes, el mercado de los colectores solares está creciendo, tanto en el sector doméstico como en el industrial. Promoviendo el tema de la sustentabilidad y usando las herramientas adecuadas, se podrá actuar mejor en los temas de la protección medioambiental y conseguir las metas en una manera más accesible.

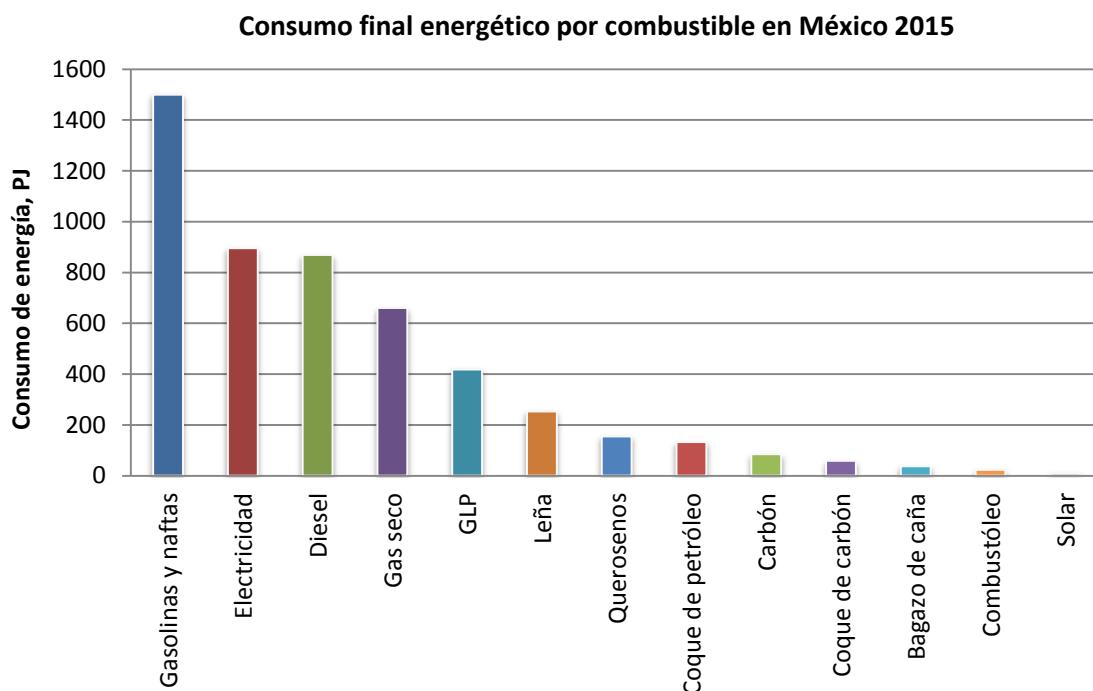


Figura 2. Desglose de consumo final energético por combustible en México en año 2015  
(Fuente: Balance Nacional de Energía, 2015 [4])

## **1.2. Objetivo**

En este trabajo se plantea el análisis del ciclo de vida de un colector solar con sistema de almacenamiento térmico con cambio de fase. El producto es un nuevo diseño que está recién desarrollado en México. Su comercialización está prevista a nivel nacional.

Los resultados esperados de este análisis son las emisiones de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono CO<sub>2</sub> equivalente) que emita el colector solar en diferentes fases de su ciclo de vida. El posible ahorro de emisiones por combustible fósil al entorno se conocerá mediante la comparación de CO<sub>2</sub> equivalente evitado por el uso de energía renovable con un colector solar para agua y el uso de gas LP en un calentador convencional en una casa familiar.

También se evaluarán diferentes escenarios de la disposición final del producto. Se compara el escenario base, donde los desechos van al vertedero, con el otro escenario, donde los elementos van al reciclado.

Gracias al análisis de los materiales y la energía necesaria para la fabricación del colector solar, se propondrán los cambios de mejora de sus componentes, tratando de afectar menos al medioambiente.

## 2. Análisis del ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una de las técnicas empleadas para la medición de los impactos medioambientales, relacionados cada día más con el avance de los productos y los servicios. La Norma ISO 14040, de la Organización Internacional de Normalización, trata de la gestión ambiental, de los principios y marco de referencia de ACV [5]. Junto con la Norma ISO 14044 [6], que describe los requisitos y directrices de ACV, forman la base de la normalización acerca de análisis de ciclo de vida a nivel internacional. Citando la definición de ACV según las normas mencionados anteriormente, este análisis significa: "la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida." El Análisis de Ciclo de Vida es la investigación acerca de un ciclo de vida de un producto desde la extracción de la materia prima, a través de la manufactura de un producto, su etapa de uso, y finalmente su disposición o procesos de reciclaje, teniendo en cuenta los medios de transporte.

EL ACV tiene influencia en distintos campos de la protección medioambiental. Gracias a la interpretación del desglose de las etapas de ciclo de vida de un producto, se puede mejorar cada una de ellas. La interpretación de los datos puede ser usada en el rediseño o diseño de productos o procesos, además, puede formar parte de la planificación estratégica en las industrias. El ACV ayuda a escoger los indicadores de desempeño KPI (en inglés: *Key Performance Indicators*) y las técnicas de medición de efectos sobre el medioambiente. También proporciona nuevos caminos al marketing, insertando al mercado los etiquetados ambientales de los productos fabricados.

Las Declaraciones Ambientales de Producto EPD (en inglés: *Environmental Product Declarations*) [7] se usan mayormente como aplicación de los estudios del Análisis de Ciclo de Vida. La declaración representa los resultados de los indicadores de las categorías del impacto, dando la información sobre el desempeño o alcance ambiental de productos y servicios. Las EPD están definidas por la norma ISO 14025, siendo una declaración ambiental certificada. Está dentro del Programa de Ecoetiquetado Tipo III, también bajo el Sistema Internacional EPD® donde se pueden revisar los productos y servicios registrados.

Los requisitos para la declaración de una categoría de producto concreta, se describen en las Reglas de Categoría de Producto PCR (en inglés: *Product Category Rules*). Gracias a esto en forma más accesible y transparente se pueden comparar los productos de EPD.

Según la Norma ISO 14044 en el estudio de ACV se distinguen cuatro fases:

1. La fase de definición del objetivo y el alcance.
2. La fase de análisis del inventario.
3. La fase de evaluación del impacto ambiental.
4. La fase de interpretación.

En el Anexo A.1. se describen más detalladamente las fases de ACV y en el Anexo A.2. sus diferentes tipos de alcance.

En la Figura 3 se especifican las etapas de ACV junto con su relación de las aplicaciones directas. Vale la pena mencionar que la técnica de ACV es iterativa. Durante la recopilación de los datos, se podría cambiar algunos aspectos del alcance del estudio para poder cumplir con el objetivo definido del análisis.

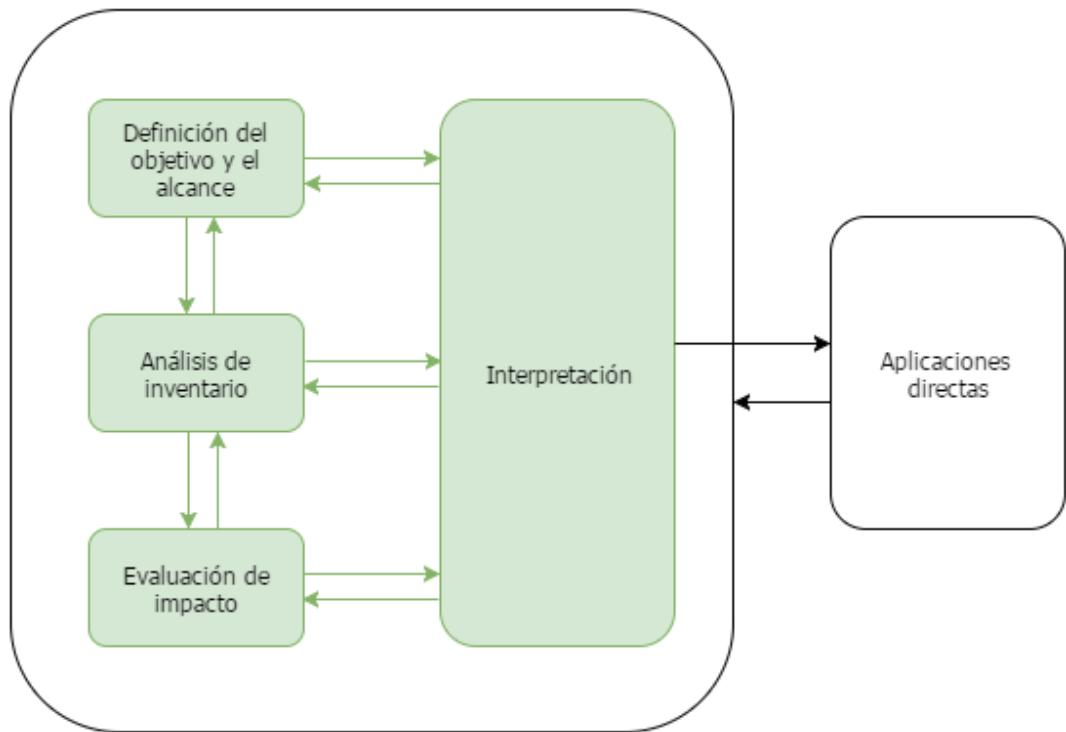


Figura 3. Marco de referencia de un análisis de ciclo de vida – etapas de un ACV  
(Fuente: Elaboración propia basado en la Norma ISO 14040 [5])

### **3. Objetivo del análisis del ciclo de vida**

El estudio de análisis del ciclo de vida del colector solar con sistema del almacenamiento térmico con cambio de fase se realiza para reconocer las emisiones de gases de efecto invernadero (expresadas en dióxido de carbono CO<sub>2</sub> equivalente) en su fase del ciclo de vida desde la obtención de los materiales de fabricación hasta su fin de vida. Con los datos obtenidos se conocerá la cantidad de emisiones que se evita en vez de uso convencional del calentador de gas LP en una casa familiar.

El colector está en fase de diseño, aún sin ningún prototipo fabricado – su estudio va a servir para el análisis básico de los materiales y procesos involucrados en la manufactura y su posible rediseño para disminuir el impacto medioambiental.

Se van a evaluar diferentes casos de la fase de disposición final. Uno teniendo en cuenta el caso base, donde los desechos se llevan al vertedero como residuos sólidos municipales y otro donde se involucra el reciclado, realizando la comparación correspondiente.

## 4. Alcance del estudio

### 4.1. Colector solar SATCF 3.0

El Colector Solar con Sistema de Almacenamiento Térmico con Cambio de Fase SATCF, fue creado en el año 2016 con el proyecto financiado por CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) que realizó la empresa *4E Power & Fuels* de Salamanca, Guanajuato, en México, junto con la Universidad de Guanajuato y el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Los derechos exclusivos del nuevo producto están descritos en la patente con el título de la invención: *Calentador solar con sistema de almacenamiento térmico, usando materiales compuestos y acelerador de convección natural* (No. MX/a/2016/017304) [8] y en la patente: *Pila térmica a partir de haz de tubos para el almacenamiento de calor con materiales de cambio de fase a diferentes temperaturas de fusión* (No. MX/a/2016/017314) [9]. La tecnología patentada del colector solar es totalmente mexicana (Figura 4).



Figura 4. Logo oficial de los productos nacionales mexicanos  
(Fuente: Secretaría de Economía, Gobierno de la República [10])

El producto es un nuevo tipo de colector solar que permite tener el suministro de agua caliente en horas nocturnas con ausencia de radiación solar. Esta ventaja se logra gracias al uso de materiales de cambio de fase. El colector termosolar está destinado para agua de baja temperatura (la temperatura entre 25 a 90°C).

En general es un tipo de colector de placa plana (Figura 5), donde sucede el fenómeno de efecto termosifón. El agua caliente baja su densidad y asciende a la parte superior del termotanque, donde está la salida del agua, obteniendo en este modo agua caliente con la mayor temperatura al suministro. Además, el colector posee la forma de placa semi-parabólica, para mejor aprovechamiento de calentamiento de agua. La velocidad del agua aumenta fluyendo en dirección ascendente.

El colector capta la energía solar y la transforma en energía térmica útil a través de un fluido de trabajo – en este caso agua. En la parte interna del termotanque se ubica el material de cambio de fase PCM, el cual calienta el agua en las horas sin radiación. El PCM (parafina) almacena su energía para poder cambiar de fase de líquida a sólida (se trata de fenómeno de calor latente), la cede al agua cuando cambia su estado de sólido a líquido, incrementando la temperatura de agua, conservando sus propiedades específicas (calor sensible). La carga del PCM sucede durante el día. El calor almacenado dentro de haz de tubos con parafina espera hasta la noche para su descarga, cuando ya no hay radiación solar. Gracias a esto la

dependencia del combustible fósil se disminuye considerablemente. La demanda que no puede cubrir la energía solar por la noche es cubierta por la energía térmica almacenada dentro del PCM. El sistema auxiliar de gas, que es el combustible más usado en México para el calentamiento de agua, se puede omitir en el sistema.

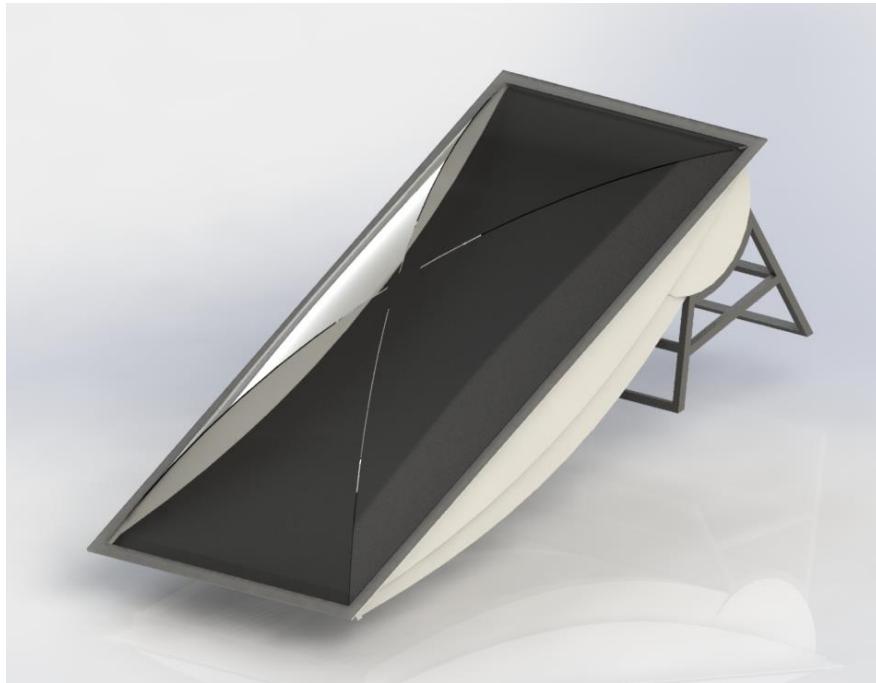


Figura 5. Modelo de diseño 3D del colector solar SATCF 3.0 en *SolidWorks*  
(Fuente: Información de diseño)

El SATCF es un equipo de una sola pieza, gracias al tipo de manufactura y ensamblaje que se le aplica. Sus componentes generales (Figura 6) son los siguientes:

1. Cámara aislante.

Es la cubierta de acrílico metacrilato en forma de domo. La cubierta permite el paso de la radiación solar. En el mismo modo aísla la placa captadora y así aumenta el efecto invernadero entre las dos placas, evitando las pérdidas por radiación y convección.

La cámara aislante lleva un marco de aluminio sellado con silicona de grado alimenticio, con ello se garantiza la protección medioambiental.

2. Captador solar.

Es una placa colectora de acero inoxidable que recibe la radiación solar. Su parte superior está cubierta con una pintura fotosensible, la cual ayuda a absorber el calor de forma más rápida. Siendo buen conductor, el acero transmite la energía captada al fluido – se forma la

conducción térmica a lo largo de la placa. En la parte inferior el calor se transfiere al agua por convección.

### 3. Termotanque.

El termotanque tiene la forma semi-parabólica de “mono-volumen”, siendo modelado con un proceso de termoformado. Su forma beneficia el efecto termosifón. Está hecho de polietileno de alta densidad. Su moldeo lleva perfiles de canales, a través de los cuales sube el agua caliente y se acelera la transferencia de calor por convección. Gracias a esto el calentamiento del fluido sucede en menos tiempo de lo convencional.

El componente está cubierto con un aislamiento exterior de espuma de poliuretano, consiguiendo una alta coeficiencia de resistencia térmica. La parte interior viene con el recubrimiento a base de pintura sanitizada mezclada con pintura elastomérica para inhibir proliferación bacteriana y formación de algas. Por último, con los aislantes se evita que se pierda el calor a lo largo del día y durante la noche.

### 4. Haz de tubos con material de cambio de fase.

El haz de tubos está colocado dentro de termotanque, en su parte superior, donde se acumula el agua caliente. El material de cambio de fase está encapsulado dentro de los tubos de aluminio, los cuales están soportados por tres mamparas. Gracias a las mamparas que forman unas distancias iguales entre los tubos, se consigue una máxima transferencia de calor entre el PCM (en inglés *Phase Change Material*) y el fluido de trabajo.

Se trata de un sistema de pila térmica a partir de haz de tubos para el almacenamiento de calor con parafina. El PCM trabaja con diferentes temperaturas de fusión, creando de esta forma tres diferentes grupos de mezclas dentro de los tubos. En total existen 21 tubos, siendo colocados en tres diferentes filas, donde en cada una hay 7 tubos. En la fila inferior la temperatura de fusión de la parafina supera los 55°C ( $T_3$ ) y allí el PCM no está mezclado con nada. El segundo nivel lleva la temperatura de fusión de la parafina entre 40-55°C ( $T_2$ ), donde la disolución está en proporciones de 4:1. En la fila superior de los tubos la temperatura de fusión está entre 25-40°C ( $T_1$ ), con un disolvente en las proporciones de 3:2. La temperatura de punto de fusión  $T_3$  es mayor que la  $T_2$ , y lo mismo pasa entre la  $T_2$  y  $T_1$ , donde la temperatura de punto de fusión en la fila superior es la más baja de todas. Gracias a este diseño con aumento de temperaturas, el proceso de descarga de calor sucede primero en la fila más baja, donde la temperatura del agua pierde su temperatura más rápido y en el mismo modo puede cubrir la demanda. Despues, el mismo proceso de descarga sucede en la fila del medio y por último en la fila superior, donde el agua caliente se mantiene más tiempo. Siendo el agua el fluido de trabajo y la parafina comercial como PCM, la temperatura de disposición alcanza hasta 85°C.

## 5. Conexiones en termotanque.

El colector tiene unos tubos de plástico que son ductos de alimentación de agua fría a la entrada, ducto de salida de agua caliente y ducto de viento para compensación de presión atmosférica. La entrada de agua fría ayuda a aumentar el efecto termosifón por su ubicación en la parte inferior del colector. El agua de entrada tiene un flujo constante. La salida de agua caliente se ubica en la parte superior del colector, donde se acumula el flujo con las temperaturas más elevadas.

## 6. Soporte.

La estructura de soporte está hecha de material anticorrosivo. Soporta el peso de toda la instalación y ajusta el ángulo de captación solar óptimo.

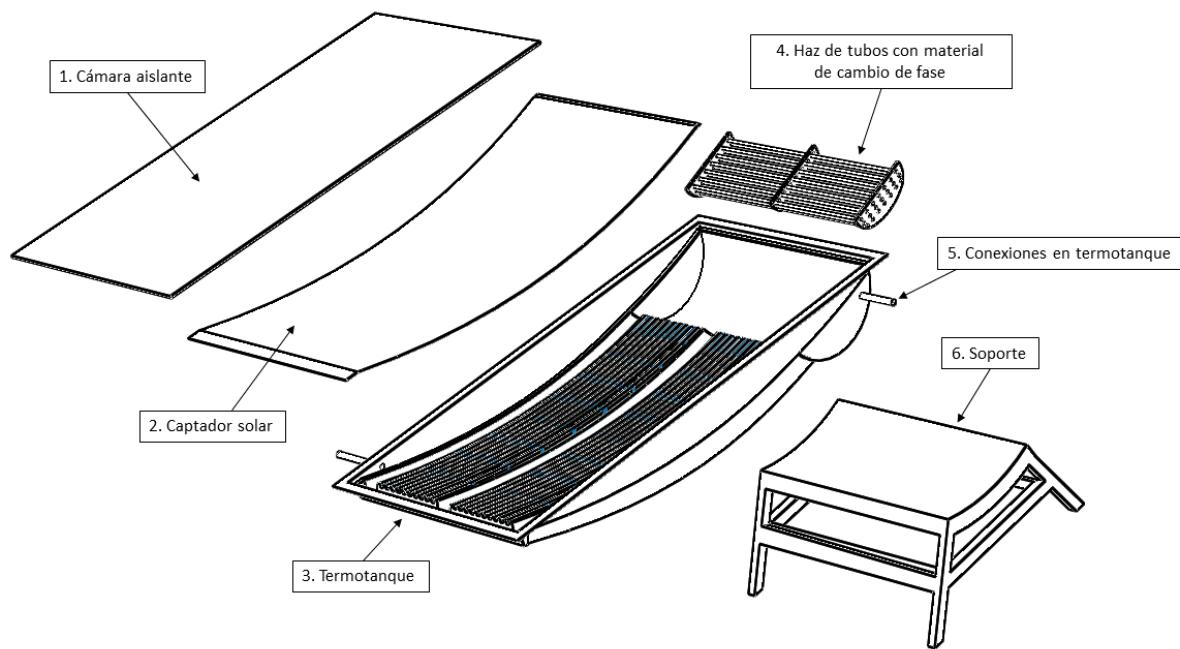


Figura 6. Esquema de componentes del colector solar diseñado en *SolidWorks*  
(Fuente: Elaboración propia en base a la información de diseño)

## 4.2. Descripción del sistema

El sistema del estudio está integrado por los siguientes componentes: un equipo de calentamiento de agua sanitaria con el colector solar SATCF 3.0, un depósito como recipiente de almacenamiento de agua proveniente de la red pública, y por último la trayectoria de tuberías, como los conductos de agua del depósito hasta el colector y el punto de suministro de agua sanitaria, junto con sus accesorios. Además se considera el empaque del colector que sale de la fábrica y va a las manos del cliente, así como todos los empaques que vienen con los materiales suministrados por los proveedores.

Este sistema está contemplado para el uso doméstico de agua caliente sanitaria de una casa familiar en México, precisamente en el estado de Guanajuato. El concepto del sistema está representado en la Figura 7.

El área de captación de colector es de 2,53 m<sup>2</sup>. Su tanque de almacenamiento de agua tiene la capacidad de 150 litros. El depósito tiene el volumen de 1 100 litros. La temperatura máxima que puede alcanzar el calentamiento del agua es 85°C. La vida útil del colector solar está determinada en 15 años.

El sistema solar tiene la función de captar la energía solar y transformarla en energía térmica. El agua caliente se almacena en el termotanque esperando la demanda de los usuarios. En el depósito se almacena el agua de red que será suministrada de manera permanente al colector o directo al suministro de agua fría en la regadera de casa. El termotanque dentro de él posee el haz de tubos con el material de cambio de fase, PCM, cuya función es la de mantener por mayor tiempo la temperatura alta dentro del colector, sobre todo en las horas de la noche cuando no existe la radiación solar.

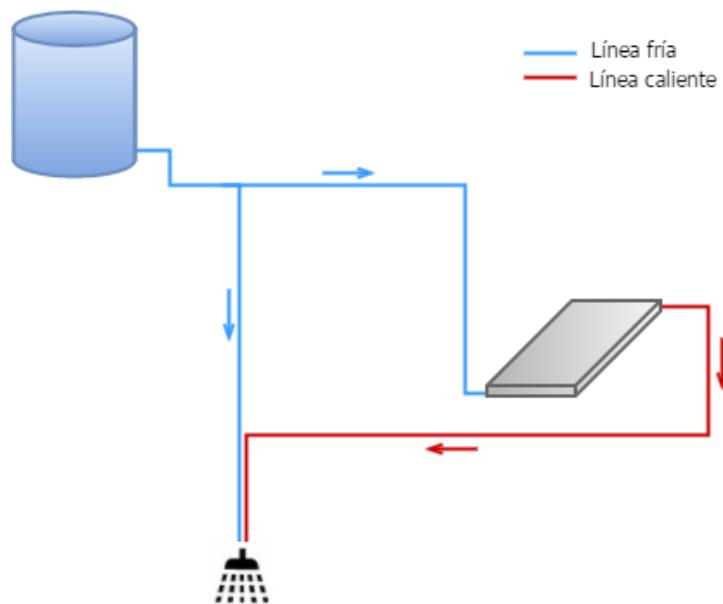


Figura 7. Esquema del sistema de estudio  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.3. Unidad funcional

La unidad funcional es la definición del sistema del producto analizado en el estudio, tanto en la fase del inventario como de la evaluación del impacto, para poder usarla como unidad de referencia. En función de ella, se fijan las entradas y las salidas del sistema [5][6].

La unidad funcional está definida como el calentamiento de 60 litros de agua sanitaria a 35°C durante 10 minutos para uso doméstico del colector solar con Sistema de Almacenamiento Térmico con Cambio de Fase - SATCF 3.0.

El siguiente esquema (Figura 8) representa su principio de operación:

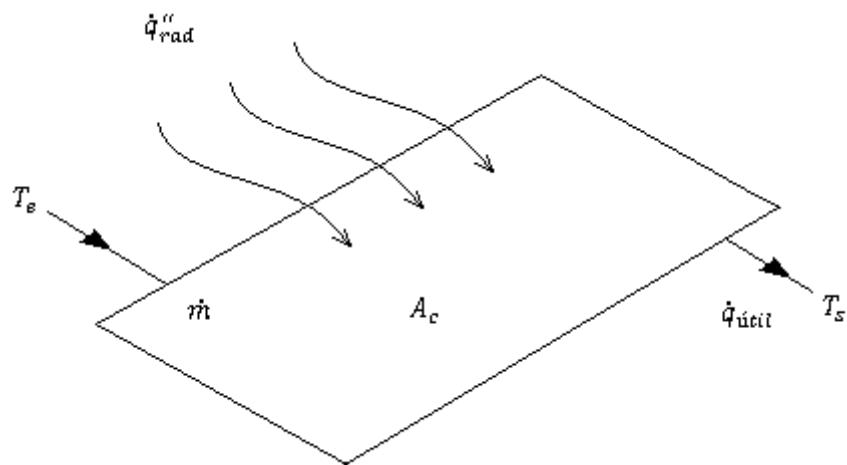


Figura 8. Principio de operación de la unidad funcional  
(Fuente: Elaboración propia)

A continuación se desarrollan los cálculos para obtener la temperatura de salida del colector solar por la tarde, después de ausencia de la radiación solar, con lo cual se confirma el funcionamiento con las temperaturas definidas de uso [11] en la unidad funcional.

El calor útil para el calentamiento del agua está determinado por el flujo de agua en el colector y sus temperaturas de entrada y salida del termotanque.

$$\dot{q}_{\text{útil}} = \dot{m} * c_p * (T_s - T_e)$$

La eficiencia del colector solar es el porcentaje de calor aprovechado de la radiación solar global sobre la superficie captadora.

$$\eta_c = \frac{\dot{q}_{\text{útil}}}{\dot{q}_{\text{rad}}'' * A_c}$$

Donde:

$\dot{q}_{\text{útil}}$  - calor útil para calentamiento del agua (kJ/s)

$\dot{m}$  - flujo de agua (kg/s)

$c_p$  - calor específico del agua (kJ/kg\*K)

$T_s$  - temperatura de salida del termotanque (K)

$T_e$  - temperatura de entrada al termotanque (K)

$\eta_c$  - eficiencia del colector solar (-)

$\dot{q}_{\text{rad}}''$  - radiación global (kJ/m<sup>2</sup>s)

$A_c$  - área del colector solar (m<sup>2</sup>)

La radiación solar de la zona del Bajío (es la región geográfica de Centronorte-Occidente de México) de un día promedio del año se define a  $6 \text{ kWh/m}^2$ . Cambiándola a otra unidad da el valor de  $21\,600 \text{ kJ/m}^2$ . El área de la placa captadora tiene  $2,53 \text{ m}^2$ . Se supone que el agua de red para la zona Bajío está a  $20^\circ\text{C}$ . El calor específico del agua es igual a  $4,18 \text{ kJ/kg*K}$ . La eficiencia del colector se estima a 65%, dado que con el calentamiento del agua y operación del sistema durante muchas horas su eficiencia baja. El volumen del termotanque es igual a 150 litros, que en este caso va a representar el flujo de agua estable.

Con las dos ecuaciones descritas y los datos mencionados anteriormente, se puede hacer los cálculos para sacar la temperatura de salida del colector:

$$\eta_c * \dot{q}_{rad}'' * A_c = \dot{m} * c_p * (T_s - T_e)$$

$$T_s = \frac{\eta_c * \dot{q}_{rad}'' * A_c}{\dot{m} * c_p} + T_e$$

$$T_s = \frac{0,65 * 21\,600 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 * \text{s}} * 2,53 \text{ m}^2}{150 \text{ kg/s} * 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg*K}}} + 293K$$

$$T_s = 349,6 \text{ K} = 76,6^\circ\text{C}$$

Este resultado define el valor de la temperatura de agua caliente sanitaria que se puede obtener para su uso, sin considerar las pérdidas de calor en las tuberías, las cuales se estiman en un valor promedio de  $5^\circ\text{C}$ .

La temperatura de confort para del uso se mantiene entre  $T_{\text{comfort}} = 33 - 35^\circ\text{C}$ . Así que con la temperatura de salida mezclada con el agua de red a  $20^\circ\text{C}$ , se consigue la temperatura deseada para el servicio.

De un balance de energía se obtiene la temperatura que tiene el colector en el termotanque después de su uso durante 10 minutos. Del flujo de agua de entrada con el flujo de agua de salida resulta el flujo total de agua. El flujo total es el volumen del termotanque. El flujo de entrada es calculado como el flujo de agua que entra durante 10 minutos. El flujo común de una regadera es de  $6 \text{ l/min}$ . Así se obtiene el flujo de  $60 \text{ l}$ , que entra a temperatura de  $20^\circ\text{C}$ . El flujo de salida es la diferencia entre flujo total y el flujo de entrada, o sea  $90 \text{ l}$ . Su temperatura es el valor calculado anteriormente, donde  $T_2 = 76,6^\circ\text{C}$ . El balance de energía es el siguiente:

$$\dot{m}_1 * c_{p1} * T_1 + \dot{m}_2 * c_{p2} * T_2 = \dot{m}_T * c_{pT} * T_T$$

$$T_T = \frac{\dot{m}_1 * c_{p1} * T_1 + \dot{m}_2 * c_{p2} * T_2}{\dot{m}_T * c_{pT}}$$

Donde:

$\dot{m}_1$  - flujo de agua de entrada (kg/s)

$c_{p1}$  - calor específico del agua de entrada (kJ/kg\*K)

$T_1$  - temperatura de entrada al termotanque (K)

$\dot{m}_2$  - flujo de agua de salida (kg/s)

$c_{p2}$  - calor específico del agua de salida (kJ/kg\*K)

$T_2$  - temperatura de salida del termotanque (K)

$\dot{m}_T$  - flujo de agua total de termotanque (kg/s)

$c_{pT}$  - calor específico del agua total de termotanque (kJ/kg\*K)

$T_T$  - temperatura total del interior del termotanque (K)

Todos los calores específicos de agua son iguales:

$$c_{p1} = c_{p2} = c_{pT}$$

Por lo que, la ecuación se simplifica a:

$$T_T = \frac{\dot{m}_1 * T_1 + \dot{m}_2 * T_2}{\dot{m}_T}$$

Dando el resultado:

$$T_T = \frac{60 \text{ kg/s} * 293 \text{ K} + 90 \text{ kg/s} * 349,6 \text{ K}}{150 \text{ kg/s}}$$

$$T_T = 326,6 \text{ K} = 53,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Con este valor de temperatura se confirma que durante 10 minutos el agua dentro de termotanque se queda a 53,6°C y que es mayor de la temperatura de confort:

$$T_T > T_{confort}$$

Con estos resultados la hipótesis de obtener agua caliente sanitaria a 35°C, durante el período de 10 minutos se cumple.

#### 4.4. Límites del sistema

El sistema analizado se considera desde la fase de obtención de los materiales necesarios para la fabricación del producto, teniendo en cuenta el transporte de los proveedores de los materiales. Despues de la manufactura se analiza la distribución al cliente y la operación y el mantenimiento del colector solar. La última fase es la disposición final. El caso base es el vertedero, el cual se compara con otro que considera el reciclado. La Figura 9 representa el alcance del ciclo de vida descrito, rodeado por una línea punteada. En el alcance no se está tomando en cuenta la obtención de materias primas y la fabricación de los materiales utilizados para la manufactura del producto.

El sistema se considera para la zona geográfica del estado de Guanajuato en México, como sitio de fabricación se define la ciudad de Salamanca. El sitio de operación se plantea en el terreno del estado mencionado, siendo el alcance de los primeros clientes del producto patentado.

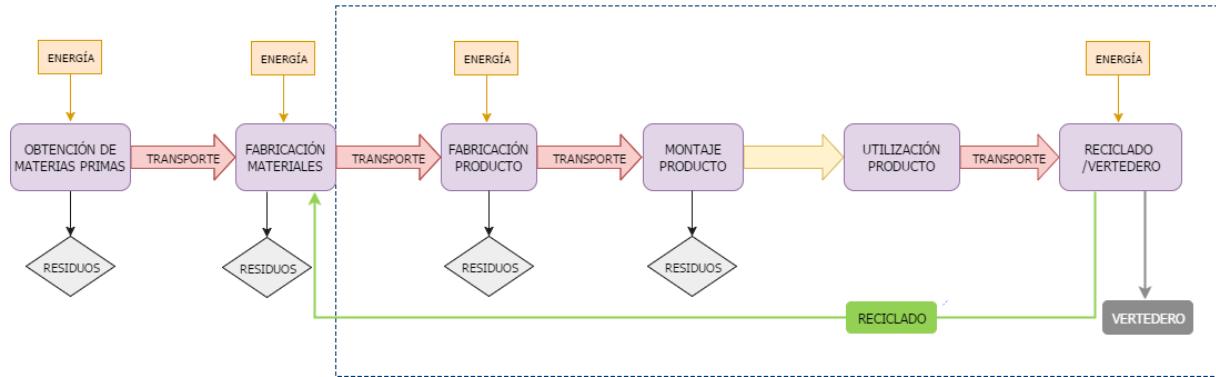


Figura 9. Alcance del estudio del análisis del ciclo de vida del colector solar  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5. Metodología y categorías de impacto

En el estudio de ACV se utiliza la herramienta *SimaPro* (versión 8.0.4.30) con la base de datos *Ecoinvent 3*. En *Ecoinvent* se aplica el modelo de sistema de asignación predeterminado.

En la metodología aplicada se usa el método de CMA-IA baseline con diez categorías de impacto [12]. En el Anexo B.1 se encuentra la información sobre el software y en el Anexo B.2. el método de evaluación de impacto CMA-IA baseline.

#### 4.6. Suposiciones y requisitos de calidad de datos

La información necesaria para el inventario del estudio se basa en la fase de diseño del colector solar. Los datos son calculados o estimados según los experimentos y análisis hechos para el desarrollo de las patentes. La ventaja de la fase de diseño de producto permite hacer los posibles cambios ya en el principio para conseguir disminuir los impactos medioambientales. El inconveniente de este tipo de fase es que los datos no son totalmente confiables, pero no afecta a la posibilidad de realizar el estudio.

## 5. Inventario del ciclo de vida

A continuación se describen todos los datos de inventario para el estudio de análisis del ciclo de vida del colector solar en cada una de sus etapas.

Generalmente los materiales y procesos seleccionados de la base de datos de *Ecoinvent 3* [13], están caracterizados como “GLO”, que significa global, de inglés: *Global*. Si en la base de datos no se encuentran los materiales con esta caracterización se eligen los datos con “RoW” para el resto del mundo, que viene de inglés: *Rest of the World*. El dato para introducción de energía eléctrica es determinado para México, con sus siglas de “MX”.

### 5.1. Materiales

Los principales componentes del colector solar son: termotanque, conexiones en termotanque, cámara aislante, captador solar, base, accesorios, empaque. Además en el conjunto de sistema analizado están el tanque de agua y el sistema de tuberías.

A continuación se presenta la Tabla 1 con los materiales enumerados para la producción de todos los componentes. Cada componente lleva su despiece y las características del material del cual está hecho. También se representa el valor de su peso. El peso total del colector solar es igual a 52,4 kg. El peso del todo el sistema junto con el tanque de agua y sistema de tuberías sube hasta 75,3 kg.

A cada material le corresponde su proveedor, con ello se puede calcular la distancia entre él y la empresa donde se plantea hacer la fabricación de los colectores. Así se obtienen los valores para el transporte de los materiales. Se colabora con los proveedores que tienen la sede en: Salamanca, Celaya, Distrito Federal, Guadalajara, Monterrey y New Jersey en Estados Unidos. El proveedor más lejano está en EE.UU. al cual se hace el pedido de la pintura captadora para el recubrimiento de la placa de acero. El resto de los materiales se obtiene del territorio de México, ante todo de las ciudades del estado de Guanajuato, o sea Salamanca y Celaya, tratando de disminuir los kilómetros de transporte y aprovechar la industria local. Introduciendo los kilómetros de transporte de los materiales que vienen del mismo proveedor se los considera solo una vez.

En la Tabla 2 se presentan los materiales de empaque. Son todos los materiales los cuales vienen a la fábrica junto con los pedidos. Entre ellos hay cajas de cartón, botes de pintura vacíos, recipientes plásticos de aislantes y otros productos de ensamblaje, bolsas de plástico y cinta adhesiva. Los pesos de estos materiales fueron estimados por mediciones *in situ* de los desechos reales, basados en las medidas de los planos de diseño.

La cinta es el producto que no se puede procesar en ninguna fase de producto ni de tratamiento de basura, por no tener la unidad de masa. Así que no está considerada en ningunos de los cálculos dentro del software *SimaPro*. En total el valor de cinta adhesiva usada en el sistema son 15,05 m, donde 5 m son los usados para el empaque de colector

solar y 10,05 m para los empaques de los materiales que vienen a la fábrica, pero a los cuales también se les considera en el tratamiento de basura.

Todos los datos son recientes con su referencia geográfica de México, donde se obtuvo la información y donde se plantea el ciclo de vida del sistema. Los datos fueron tomados del grupo de personas que realizó el diseño del colector solar, respetando los términos de confidencialidad para protección de la propiedad intelectual. A partir de un modelo analítico que fue simulado mediante software *Ansys* y *SolidWorks* para comportamiento fluido-dinámico y estructural se propusieron las geometrías y configuraciones del sistema. Luego se crearon los planos dimensionados del colector para ofrecer el mayor rendimiento y eficiencia en su manufactura y operación.

En este modo la calidad de datos está determinada como “calculada” o “estimada”. Algunos materiales fueron tomados y pesados *in situ*, están descritos como la calidad “calculada”. Para el resto se tomó en cuenta la información otorgada por los proveedores en las fichas de seguridad y descritos como la calidad “estimada”. El dato de cantidad de uso fue basado en las propiedades de cada material y las dimensiones del sistema.

En la Figura 10 se representa todo el despiece del colector solar en un modelo hecho mediante *SolidWorks* por las personas encargadas del diseño.

Tabla 1. Inventario de los materiales del sistema  
(Fuente: Elaboración propia en base a la información de diseño)

| Componente | Pieza                     | Material | Característica             | Valor   | Unidad  | Antigüedad de datos | Referencia geográfica | Proveedor | Distancia (km) | Fuente de datos  | Calidad de datos (estimada/calculada) |        |           |
|------------|---------------------------|----------|----------------------------|---|---|---------------------|-----------------------|-----------|----------------|------------------|---------------------------------------|--------|-----------|
| 1          | Termotanque               | 1.1      | Tanque                     | Polietileno de Alta Densidad HDPE (Figura 11) | Plástico de alta resistencia para moldeo de termoformado. Flexibilidad, dureza, rigidez. Dimensiones de lámina: 2,44 m x 1,22 m. Espesor: 6 mm. Color negro.  | 21,150              | kg                    | Reciente  | México         | Monterrey        | 725                                   | Diseño | Calculada |
|            |                           | 1.2      | Aislante térmico           | Elastomérico                                  | Hecho de microesferas cerámicas. Polvo blanco seco, sin olor. Altas propiedades termoaislantes. Refleja el calor. Convierte pintura en una barrera radiante.  | 0,250               | kg                    | Reciente  | México         | Salamanca        | 1,5                                   | Diseño | Estimada  |
|            |                           | 1.3      | Pintura sanitizada         | Pintura epóxica, Catalizador, Solvente        | Resistencia a los agentes químicos y atmosféricos. Inhibe el crecimiento biológico.   | 0,535               | kg                    | Reciente  | México         | Distrito Federal | 300                                   | Diseño | Estimada  |
|            |                           | 1.4      | Aislante                   | Espuma de poliuretano                         | Polímero expandible de baja densidad.   | 0,340               | kg                    | Reciente  | México         | Salamanca        | 1,5                                   | Diseño | Estimada  |
|            |                           | 1.5      | Encapsulado con tapones    | Aluminio                                      | 3 filas de 7 tubos pequeños. Longitud: 685 mm, diámetro: 12 mm.   | 0,969               | kg                    | Reciente  | México         | Salamanca        | 4                                     | Diseño | Calculada |
|            |                           | 1.6      | Material de cambio de fase | Parafina                                      | Temperaturas del punto de fusión 25°C <T< 40°C, disolución al 40%.<br>Temperaturas del punto de fusión 40°C <T< 55°C, disolución al 20%.<br>Temperaturas del punto de fusión T > 55°C, no lleva disolvente. | 0,811               | kg                    | Reciente  | México         | Salamanca        | 1,5                                   | Diseño | Calculada |
|            |                           | 1.7      | Disolvente                 | Xilol   | Mezcla de hidrocarburos aromáticos.   |                     |                       |           |                |                  |                                       |        | Calculada |
|            |                           | 1.8      | Mamparas                   | Polietileno de Alta Densidad HDPE             | 3 piezas en forma de media luna.  |                     |                       |           |                |                  |                                       |        | Calculada |
| 2          | Conexiones en termotanque | 2.1      | Tubos                      | Plástico CPVC                                 | Alto índice de estanqueidad. Resistencia química y ambiental. Diámetro: 3/4".   | 0,060               | kg                    | Reciente  | México         | Salamanca        | 4,2                                   | Diseño | Calculada |
| 3          | Cámara aislante           | 3.1      | Placa                      | Acrílico metacrilato                          | Placa transparente. Dimensiones de lámina: 2,44 m x 1,22 m. Espesor: 0,9 mm.  | 3,161               | kg                    | Reciente  | México         | Monterrey        | 725                                   | Diseño | Calculada |

|   |                     |     |                    |                              |  |        |    |          |        |                     |       |        |           |
|---|---------------------|-----|--------------------|------------------------------|--|--------|----|----------|--------|---------------------|-------|--------|-----------|
|   |                     | 3.2 | Marco              | Aluminio                     | 1/2" x 1/2", perfil L. Espesor: 1 mm.  | 0,500  | kg | Reciente | México | Salamanca           | 4     | Diseño | Calculada |
| 4 | Captador solar      | 4.1 | Placa colectora    | Acero inoxidable (Figura 12) | Forma curvada. Dimensiones de lámina: 2,3 m x 1,1 m. Espesor: 0,7 mm.  | 13,810 | kg | Reciente | México | Salamanca           | 5     | Diseño | Calculada |
|   |                     | 4.2 | Pintura captadora  | Polímero de silicona         | Alta resistencia a exposición UV. Fotosensible.  | 0,450  | kg | Reciente | México | New Jersey, EE. UU. | 3 960 | Diseño | Estimada  |
| 5 | Base                | 5.1 | Soporte            | Acero inoxidable (Figura 13) | Para uso exterior, resistencia a la exposición solar, lluvia ácida, humedad. Lleva 6 pernos.   | 3,157  | kg | Reciente | México | Guadalajara         | 315   | Diseño | Calculada |
| 6 | Accesorios          | 6.1 | Sellos y empaques  | Pegamento epóxico            | Dos componentes sin solventes de efecto inmediato y alta firmeza.  | 0,028  | kg | Reciente | México | Salamanca           | 4     | Diseño | Estimada  |
|   |                     | 6.2 |                    | Silicona                     | Resistente al calor, mantiene sus propiedades de sellado a altas temperaturas de operación. Usada como empaque a 20°C. De grado alimenticio. | 0,543  | kg | Reciente | México | Celaya              | 46    | Diseño | Estimada  |
|   |                     | 6.3 | Tornillería        | Acero inoxidable             | Tipo pija de cabeza 3/8" con longitud de 1/2". 40 piezas.  | 0,500  | kg | Reciente | México | Celaya              | 46    | Diseño | Calculada |
| 7 | Empaque             | 7.1 | Caja               | Cartón                       | Biodegradable.   | 5,000  | kg | Reciente | México | Celaya              | 46    | Diseño | Estimada  |
|   |                     | 7.2 | Sello              | Cinta adhesiva               | Plástica, de una sola cara.  | 5,000  | m  | Reciente | México | Salamanca           | 2     | Diseño | Estimada  |
|   |                     | 7.3 | Relleno de empaque | Poliespuma - Polietileno     | Absorción de impactos por manejo y transporte.   | 0,200  | kg | Reciente | México | Salamanca           | 2     | Diseño | Estimada  |
| 8 | Tanque de agua      | 8.1 | Depósito           | Polietileno                  | Almacenamiento de agua potable. Capacidad de tanque: 1100 litros.  | 19,500 | kg | Reciente | México | Salamanca           | 3,2   | Diseño | Calculada |
| 9 | Sistema de tuberías | 9.1 | Conector           | PVC                          | 3 piezas de rosca externa 3/4".  | 0,045  | kg | Reciente | México | Salamanca           | 4,2   | Diseño | Estimada  |
|   |                     | 9.2 |                    | CPVC                         | 2 piezas de rosca interna 3/4".  | 0,030  | kg | Reciente | México | Salamanca           | 4,2   | Diseño | Estimada  |
|   |                     | 9.3 |                    |                              | 2 piezas rosca externa 3/4".   | 0,030  | kg | Reciente | México | Salamanca           | 4,2   | Diseño | Estimada  |
|   |                     | 9.4 | Válvula            | Cobre                        | 1 pieza rosca interna 3/4".  | 0,060  | kg | Reciente | México | Salamanca           | 4,2   | Diseño | Estimada  |
|   |                     | 9.5 |                    | CPCV                         | 2 piezas tipo esfera 3/4".   | 0,190  | kg | Reciente | México | Salamanca           | 4,2   | Diseño | Estimada  |
|   |                     | 9.6 |                    |                              | 1 pieza tipo check 3/4".   | 0,280  | kg | Reciente | México | Salamanca           | 4,2   | Diseño | Estimada  |
|   |                     | 9.7 | Tubo T             | CPVC                         | 2 piezas de 3/4".  | 0,040  | kg | Reciente | México | Salamanca           | 4,2   | Diseño | Estimada  |
|   |                     | 9.8 | Codo               | CPVC                         | 8 piezas de 3/4".  | 0,120  | kg | Reciente | México | Salamanca           | 4,2   | Diseño | Estimada  |

|  |  |      |                   |                             |  |       |    |          |        |           |     |        |          |
|--|--|------|-------------------|-----------------------------|--|-------|----|----------|--------|-----------|-----|--------|----------|
|  |  | 9.9  | Tubo              | CPVC                        | Longitud: 12 m. Diámetro: 3/4".                              | 2,028 | kg | Reciente | México | Salamanca | 4,2 | Diseño | Estimada |
|  |  | 9.10 | Cobre             | Cobre                       | Longitud: 1,5 m. Diámetro: 1/2".                             | 0,288 | kg | Reciente | México | Salamanca | 4,2 | Diseño | Estimada |
|  |  | 9.11 | Reducción         | Cobre                       | 1 pieza para reducción de 3/4" a 1/2".                       | 0,040 | kg | Reciente | México | Salamanca | 4,2 | Diseño | Estimada |
|  |  | 9.12 | Niple para soldar | Cobre                       | 1 pieza de 3/4" x 1".  | 0,022 | kg | Reciente | México | Salamanca | 4,2 | Diseño | Estimada |
|  |  | 9.13 | Cople             | CPVC                        | 2 piezas de 3/4".  | 0,020 | kg | Reciente | México | Salamanca | 4,2 | Diseño | Estimada |
|  |  | 9.14 | Tuerca unión      | CPVC                        | 2 piezas de 3/4".  | 0,090 | kg | Reciente | México | Salamanca | 4,2 | Diseño | Estimada |
|  |  | 9.15 | Pegamento         | Resina epoxi                | Pegamento para CPVC y PVC.                                   | 0,053 | kg | Reciente | México | Salamanca | 4,2 | Diseño | Estimada |
|  |  | 9.16 | Cinta teflón      | Politetrafluoroetileno PTFE | Para el sellado de roscas. No reacciona con el vapor y agua. | 0,005 | kg | Reciente | México | Salamanca | 4,2 | Diseño | Estimada |
|  |  | 9.17 | Pasta para soldar | Cloruro de amonio           | Fundente inhibidor de oxidación.                             | 0,005 | kg | Reciente | México | Salamanca | 4,2 | Diseño | Estimada |
|  |  | 9.18 | Combustible       | Gas butano                  | Sirve para la fusión de soldadura.                           | 0,027 | kg | Reciente | México | Salamanca | 4,2 | Diseño | Estimada |
|  |  | 9.19 | Soldadura estaño  | Estaño 60%, Plomo 40%       | Funde a 183°C.   | 0,015 | kg | Reciente | México | Salamanca | 4,2 | Diseño | Estimada |

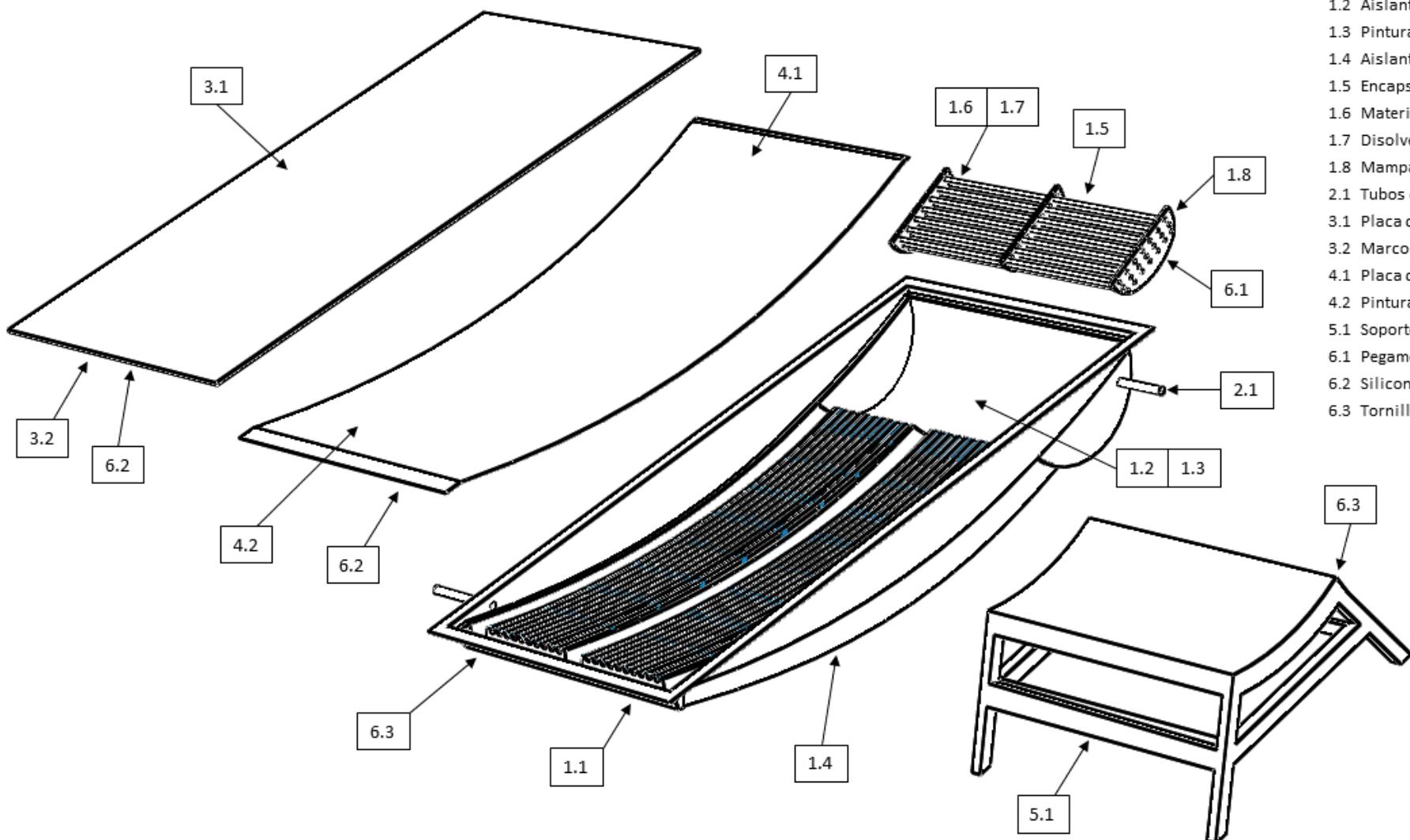


Figura 10. Despiece del colector solar presentado en *SolidWorks*  
(Fuente: Elaboración propia en base a la información de diseño)

Tabla 2. Inventario de los materiales de empaque  
(Fuente: Elaboración propia)

| Material de empaque |                              | Característica  | Valor  | Unidad | Antigüedad de datos | Referencia geográfica | Distancia   | Calidad de datos |
|---------------------|------------------------------|---|--------|--------|---------------------|-----------------------|---|------------------|
| 1                   | Cartón                       | Empaque de láminas, soporte, aluminio, parafina.                    | 3,373  | kg     | Reciente            | México                | Los empaques vienen junto con los materiales, así que el transporte de ellos ya es considerado anteriormente. | Estimada         |
| 2                   | Polietileno de baja densidad | Bolsas de plástico. Empaque para accesorios de tuberías, tornillos. | 0,012  | kg     | Reciente            | México                |   | Estimada         |
| 3                   | Polietileno de alta densidad | Recipientes de productos de ensamblaje.                             | 0,101  | kg     | Reciente            | México                |   | Estimada         |
| 4                   | Bote de hierro               | Botes de pintura.   | 0,194  | kg     | Reciente            | México                |   | Estimada         |
| 5                   | Cinta adhesiva               | Empaque de tubos, depósito.   | 10,050 | m      | Reciente            | México                |   | Estimada         |

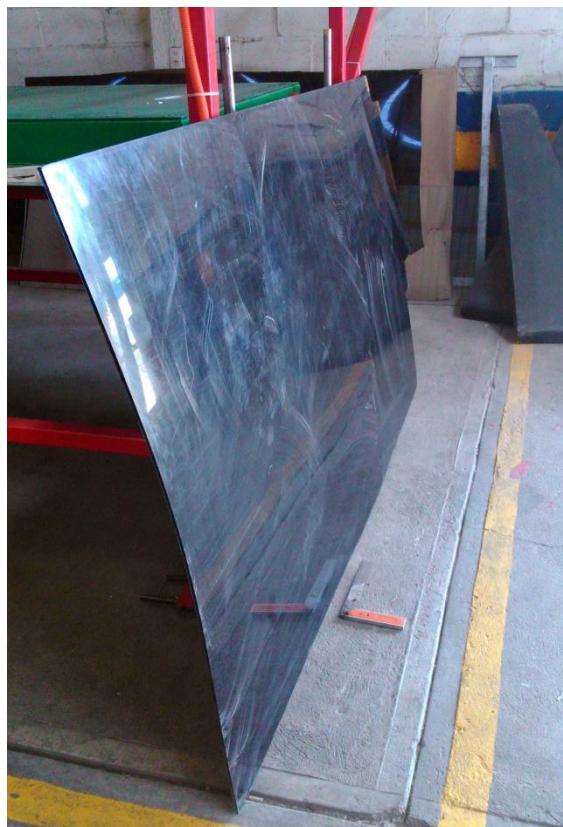


Figura 11. Material de tanque – polietileno de alta densidad HDPE  
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 12. Material de placa colectora – acero inoxidable  
(Fuente: Elaboración propia)

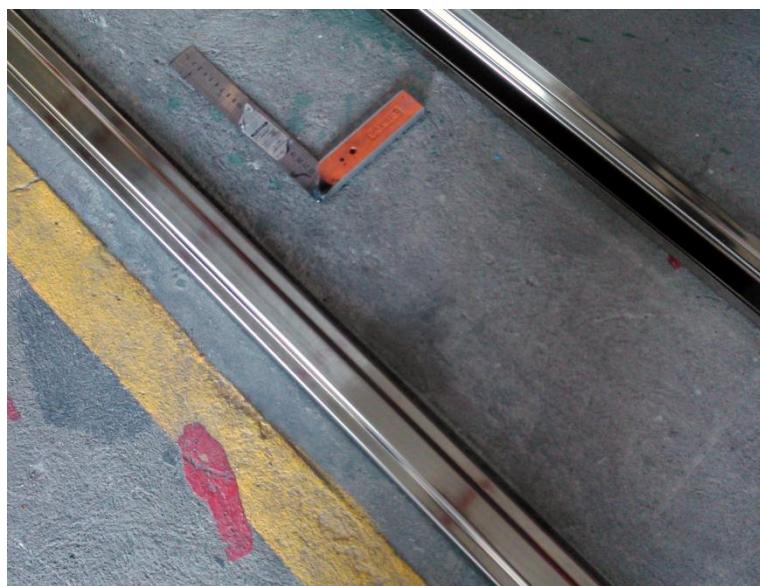


Figura 13. Material de base – acero inoxidable  
(Fuente: Elaboración propia)

## 5.2. Producción

La manufactura del colector se plantea en el espacio de la empresa involucrada en el proyecto de CONACYT, que se ubica en Salamanca.

La fabricación se puede dividir en cinco fases, en las que inicialmente se lleva a cabo la preparación de componentes para posteriormente juntarlos en la última fase.

En la primera fase se prepara la cámara aislante. La placa de acrílico metacrilato está modelada con el termoformado positivo para obtener la forma de domo. Primero se calienta la termoformadora (Figura 14) usando 500 Wh y después se realiza el termoformado usando la energía eléctrica de 12 Wh. El marco de aluminio se corta con las dimensiones deseadas y se junta con la placa de acrílico usando la silicona. En el proceso de corte se utilizan 3 Wh.

En la siguiente fase una máquina roladora le da forma a la placa de acero inoxidable usando 12 Wh de electricidad. A continuación es perforada y doblada manualmente. Para la perforación de bordes se necesitan 6 Wh. Para que cumpla el papel del captador solar la placa se pinta con una pintura captadora de alta resistencia a exposición UV y tiene la característica de fotosensibilidad. El pintado se elabora con 12 Wh.

A continuación se lleva a cabo el llenado y sellado de los 21 tubos de aluminio con material de cambio de fase, o sea parafina. Dependiendo de los tres niveles de temperatura del punto de fusión la parafina se disuelve en las proporciones adecuadas. Las mamparas donde se sujetan los tubos pequeños, se cortan y perforan. Para estos procesos se utiliza la energía eléctrica de 3 Wh y 6 Wh. En las tres mamparas teniendo la forma de media luna se ubican los tubos pequeños de forma manual. Así se crea el elemento llamado “haz de tubos”, que después se coloca dentro del termotanque. Para obtener el tanque se termoforma la lámina de polietileno de alta densidad. Con el calentamiento se usan 750 Wh y con el termoformado negativo 12 Wh de electricidad. La siguiente etapa es el pintado interno con la pintura sanitizada mezclada con el aislante térmico en polvo, para lo cual se ocupan 6 Wh. Además se agrega el aislamiento externo de poliuretano con una pistola aplicadora que ocupa 6 Wh. Teniendo el haz de tubos y el tanque se realiza el ensamblaje con el pegamento epóxico de forma manual. El mismo pegamento se aplica para juntar las partes de tubos de CPVC en el termotanque para la entrada y la salida del agua.

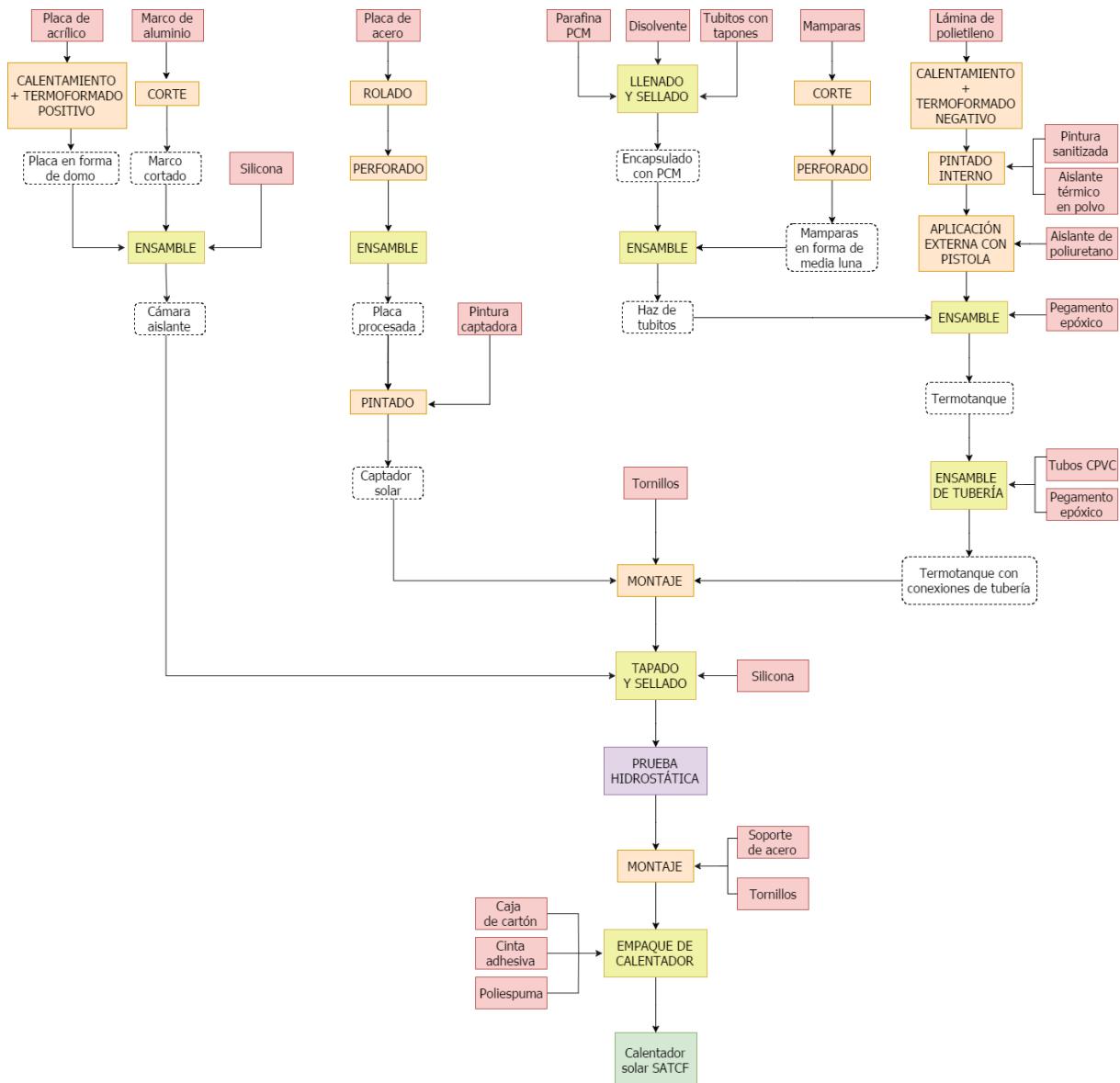


Figura 14. Termoformadora en su fase de manufactura  
(Fuente: Elaboración propia)

En la última fase de ensamblaje de todos los componentes, primero se monta el termotanque con el captador solar. Para este proceso se ocupa el atornillador con uso de 6 Wh de energía y los tornillos necesarios. Lo siguiente es el tapado y sellado de la cámara aislante con aplicación manual de silicona. Después de estos procesos se realiza la prueba hidrostática de colector, para confirmar que no lleva ninguna fuga. Para esta prueba se necesitan 324 Wh de energía indirecta. A continuación, se presenta el método de cálculo para obtener el valor de energía utilizada. Los litros de agua necesarios para la prueba dan un valor de 75 litros. Teniendo el recipiente de agua de red con un volumen de 7 500 litros, se cuenta con suficiencia para 100 pruebas con diferentes colectores solares. El último ensamblaje para el producto del colector es el montaje de soporte de acero inoxidable. Se ocupan los tornillos y el atornillador con 6 Wh de energía eléctrica.

El último proceso es el empaque del colector, que se elabora manualmente. El producto se coloca dentro de una caja de cartón y se llena de poliespuma, la cual protege el producto durante el manejo y transporte. El cartón se sella con la cinta adhesiva. De este modo el producto es preparado para el pedido del cliente.

Abajo se presenta la Figura 15 que ilustra la línea de producción del colector solar SATCF 3.0.



Nomenclatura:



Figura 15. Línea de producción de colector solar  
(Fuente: Elaboración propia)

Los datos tomados para los cálculos de la energía eléctrica, tanto directa como indirecta, necesaria para la manufactura se representan en la Tabla 3. Conociendo la potencia de cada máquina y su tiempo de uso, se calcula la energía consumida para cada proceso. En total para la producción del colector solar es necesario consumir la energía de 1,667 kWh.

En la energía consumida no se contemplan consumos indirectos como iluminación del sitio ni servicios adicionales, debido a la diversidad de actividades que conlleva la nave de producción destinada a la manufactura del colector solar.

Tabla 3. Energía utilizada en la manufactura del colector solar  
(Fuente: Elaboración propia)

| Proceso                                   | Tipo de energía usada | Potencia de máquina (kW) | Tiempo de uso (min)       | Energía consumida (kWh)              |
|---|-----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Calentamiento                             | Eléctrica             | 3,000                    | 10                        | 0,500                                |
| Termoformado positivo                     | Eléctrica             | 0,746                    | 1                         | 0,012                                |
| Corte de marco de aluminio                | Eléctrica             | 0,373                    | 0,5                       | 0,003                                |
| Rolado de placa de acero                  | Eléctrica             | 0,746                    | 1                         | 0,012                                |
| Perforado de placa de acero               | Eléctrica             | 0,373                    | 1                         | 0,006                                |
| Pintado de placa de acero                 | Eléctrica             | 0,373                    | 2                         | 0,012                                |
| Corte de mamparas                         | Eléctrica             | 0,373                    | 0,5                       | 0,003                                |
| Perforado de mamparas                     | Eléctrica             | 0,373                    | 1                         | 0,006                                |
| Calentamiento                             | Eléctrica             | 3,000                    | 15                        | 0,750                                |
| Termoformado negativo                     | Eléctrica             | 0,746                    | 1                         | 0,012                                |
| Pintado de lámina de polietileno          | Eléctrica             | 0,373                    | 1                         | 0,006                                |
| Aplicación de aislante de poliuretano     | Eléctrica             | 0,373                    | 1                         | 0,006                                |
| Montaje de captador solar con termotanque | Eléctrica             | 0,373                    | 1                         | 0,006                                |
| Montaje de soporte                        | Eléctrica             | 0,373                    | 1                         | 0,006                                |
| <b>TOTAL</b>                              |                       |                          |                           | <b>1,343</b>                         |
| Proceso                                   | Tecnología            | Consumo de aire (l)      | Energía indirecta (kWh/l) | Energía consumida (kWh)              |
| Prueba hidrostática                       | Neumática             | 180                      | 0,0018                    | 0,324                                |
| <b>TOTAL</b>                              |                       |                          |                           | <b>0,324</b>                         |
| <b>1,667</b>                              |                       |                          |                           | <b>TOTAL ENERGÍA UTILIZADA (kWh)</b> |

En el proceso de manufactura, el único proceso que usa la tecnológica neumática es la prueba hidrostática. En este caso la energía consumida es la energía eléctrica indirecta. Para poder calcular el consumo de electricidad, hay que calcular la energía indirecta. El compresor usado en este proceso tiene potencia de 2 hp, su capacidad de llenado de tanque son 25 l, la capacidad de flujo volumétrico son 96 l/min. El consumo de aire son 180 l, con su tiempo de operación de 1,87 min.

Conociendo las especificaciones de la máquina usada, se puede calcular lo siguiente:

$$Energía_{Indirecta} = \frac{Corriente * Voltaje_{Consumo} * Tiempo_{Funcionamiento}}{Capacidad_{Máquina}}$$

$$Energía_{Indirecta} = \frac{12,5 \text{ A} * 120 \text{ V} * 0,03 \text{ h}}{25 \text{ l}}$$

$$Energía_{Indirecta} = 0,0018 \frac{kWh}{l}$$

De este modo se obtiene el resultado que dice que la energía necesaria para la prueba hidrostática es 324 Wh, sabiendo que el consumo de aire es de 180 litros.

Para elegir el tipo de electricidad en el software se toma el dato de la media de bajo voltaje de México.

### 5.3. Distribución

Se supone que el mercado de los colectores solares en los primeros años de producción va a ser el Estado de Guanajuato. Se considera que la distancia media analizada de distribución es de 150 km, usando un vehículo ligero comercial de carga.

La fase de montaje no fue considerada debido a que únicamente se contempla el uso de mano de obra y estas acciones se llevan a cabo en forma manual.

### 5.4. Uso

La etapa de operación no determina ningún tipo de uso de energía, dado que el colector aprovecha la energía solar para calentamiento de agua.

El mantenimiento del producto se supone con la necesidad de cambiar dos materiales. Uno de ellos es la placa de acrílico metacrilato que hay que cambiar cada 5 años. En este caso con la vida útil del colector de 15 años, el cambio se realizaría dos veces. El otro es la espuma de poliuretano que habría que reemplazar una vez, su cambio es necesario cada 7 años y medio. En total el peso de los materiales es de 6,66 kg. En esta etapa se considera el transporte inicial de los proveedores de los materiales.

El transporte de mantenimiento se estima a 150 km, con el viaje de ida y vuelta a la casa de usuario. Se supone el uso de un coche de pasajero a gasolina de tamaño mediano. Los kilómetros están divididos por 4, porque el vehículo tiene la capacidad de 4 personas.

## 5.5. Fin de vida

Para la disposición final se consideran los materiales usados anteriormente en la fabricación del producto, el cual es el colector solar y también para el sistema de tuberías, como para los empaques de materiales que vienen de los proveedores. En total el peso de todos los residuos son 79 kg.

El caso es representado en dos escenarios. El escenario básico es el tratamiento de residuos sólidos urbanos con su fin de vida en el vertedero.

El otro escenario es la disposición final, donde el 5% de los residuos van al vertedero (son los 3,7 kg) y el otro 95% va al reciclado (con peso de 75,3 kg). De los residuos tipo reciclables se considera que el 70% de su peso total se entrega al reciclaje, por razones de daños y usos, donde el material ya no sirve para el tratamiento. En resumen, los residuos reciclables representan un 66,7% y los no reciclables 33,3% (Tabla 4).

Tabla 4. Total de residuos reciclables y no reciclables  
(Fuente: Elaboración propia)

| Tipo de residuo                      | Peso total (kg) | 70% de peso total (kg) | Porcentaje (%) |
|--------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|
| PE (Polietileno)                     | 41,9            | <b>29,4</b>            | 55,72          |
| Plásticos                            | 3,2             | <b>2,2</b>             | 4,21           |
| PVC (Policloruro de vinilo)          | 2,7             | <b>1,9</b>             | 3,53           |
| Cartón                               | 8,4             | <b>5,9</b>             | 11,13          |
| Aluminio                             | 1,5             | <b>1,0</b>             | 1,95           |
| Acero y hierro                       | 17,7            | <b>12,4</b>            | 23,47          |
| Total recicitable                    | 75,3            | <b>52,7</b>            | 100%           |
| Residuos no reciclables              | 3,7             | <b>26,3</b>            |                |
| Pesos total de materiales y desechos |                 | 79,0                   |                |

## 5.6. Transporte

El proceso de transporte no se distingue como una etapa apartada, sino que sus características están dentro de cada una con sus valores correspondientes.

Las características de transporte durante el ciclo de vida de colector solar se representan en la Tabla 5. El tipo de transporte siempre es el mismo - por la carretera. Los vehículos, dependiendo del peso que tienen que llevar, varían por su tipo pero se estima que todos ellos usan gasolina como combustible. Junto con el tipo de vehículo se presenta su consumo. Con la distancia calculada se obtiene el uso de combustible. En total resultan 4,78 l. Hay que tener en cuenta que la distancia es tan baja, porque se elabora en las unidades de t\*km usados en el software, donde dependiendo de la carga transportada, los km se proporcionan junto con el peso, para que el resultado sea determinado únicamente a un colector solar, es decir, a los materiales que construyen una sola pieza.

En la primera fase de fabricación, el transporte que se tiene en cuenta es la distancia que atraviesan los vehículos de los proveedores para llevar el material a la fábrica. Se distinguen cuatro diferentes tipos de vehículos, usados dependiendo de la carga que tienen que mover.

En la fase de distribución la distancia se determina como 150 km, por establecer el mercado estatal de Guanajuato. El peso del sistema de 75 kg se multiplica por el valor de la distancia y se obtiene el valor buscado.

La operación y mantenimiento considera la etapa en la que el material que va a ser renovado del colector solar llega al sitio de fabricación, o sea desde el proveedor hasta la fábrica. Los materiales que se renuevan son: la espuma de poliuretano que viene de Salamanca y la placa de acrílico metacrilato proveniente de Monterrey. Las distancias desde los proveedores son las mismas que las determinadas en la Tabla 1 anteriormente presentada. Los vehículos empleados para estas acciones son: un camión de carga y un automóvil de tamaño mediano. Además, se calcula la distancia necesaria para los 3 viajes durante los cuales hay que hacer el mantenimiento al cliente. Cada viaje de ida y vuelta tiene trayecto estimado de 300 km, que es el mismo valor fijado anteriormente para la distribución. El automóvil usado para estos trayectos en las acciones de mantenimiento es de tamaño mediano, con capacidad para 4 personas. Por eso el valor de distancia también se divide por 4. Para restablecer las mismas unidades de distancia de  $t \cdot km$ , hay que suponer el peso transportado. La estimación es de 80 kg.

De la disposición final se estima un viaje de 50 km de trayecto usando el camión de carga, con el peso total de residuos de 79 kg, que conlleva el colector solar con su empaque, sistema de tuberías, más los empaques de todos los materiales ordenados de los proveedores.

Tabla 5. Transporte y sus características en diferentes fases del ciclo de vida  
(Fuente: Elaboración propia)

| Fase del ciclo de vida        | Tipo de transporte | Distancia (t*km) | Tipo de combustible            | Tipo de vehículo                        | Consumo (l/km) | Combustible (l*t) |
|-------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|---|----------------|-------------------|
| Transporte de proveedor       | Carretera          | 16,000           | Gasolina                       | Camión de carga 3,5-7,5 ton             | 0,120          | 1,920             |
| Transporte de proveedor       | Carretera          | 5,377            | Gasolina                       | Camión de carga                         | 0,110          | 0,592             |
| Transporte de proveedor       | Carretera          | 0,248            | Gasolina                       | Vehículo de carga tipo comercial ligero | 0,070          | 0,017             |
| Transporte de proveedor       | Carretera          | 0,591            | Gasolina                       | Automóvil de tamaño grande              | 0,060          | 0,035             |
| Transporte de proveedor       | Carretera          | 0,046            | Gasolina                       | Automóvil de tamaño mediano             | 0,055          | 0,003             |
| Distribución                  | Carretera          | 11,250           | Gasolina                       | Vehículo de carga tipo comercial ligero | 0,070          | 0,788             |
| Operación y mantenimiento     | Carretera          | 0,006            | Gasolina                       | Camión de carga                         | 0,110          | 0,001             |
| Operación y mantenimiento     | Carretera          | 18,016           | Gasolina                       | Automóvil de tamaño mediano             | 0,055          | 0,991             |
| Disposición final             | Carretera          | 3,950            | Gasolina                       | Camión de carga                         | 0,110          | 0,435             |
| <b>Total distancia (t*km)</b> |                    | <b>55,485</b>    | <b>Total combustible (l*t)</b> |   |                | <b>4,780</b>      |

En la primera fase se consume la mayor parte del combustible, donde los valores de distancias son más grandes por tener que atravesar muchos kilómetros para que todos los materiales pedidos lleguen a la fábrica. En la parte de disposición final el consumo de combustible es el menor de todos. La distancia para transportar los desechos hasta su tratamiento es muy pequeña en comparación con las distancias de las otras fases.

## 6. Evaluación del impacto del ciclo de vida

Para hacer la evaluación del impacto del ciclo de vida del colector solar ha sido usado el software *SimaPro* con el método europeo CML-IA baseline V3.00 / EU25.

El árbol de componentes generales del estudio realizado se representa en la Figura 16, en el cual se distinguen la producción, distribución, uso y fin de vida. En la fabricación se localiza el término “calentador solar”, que también va a ser evaluado independientemente.

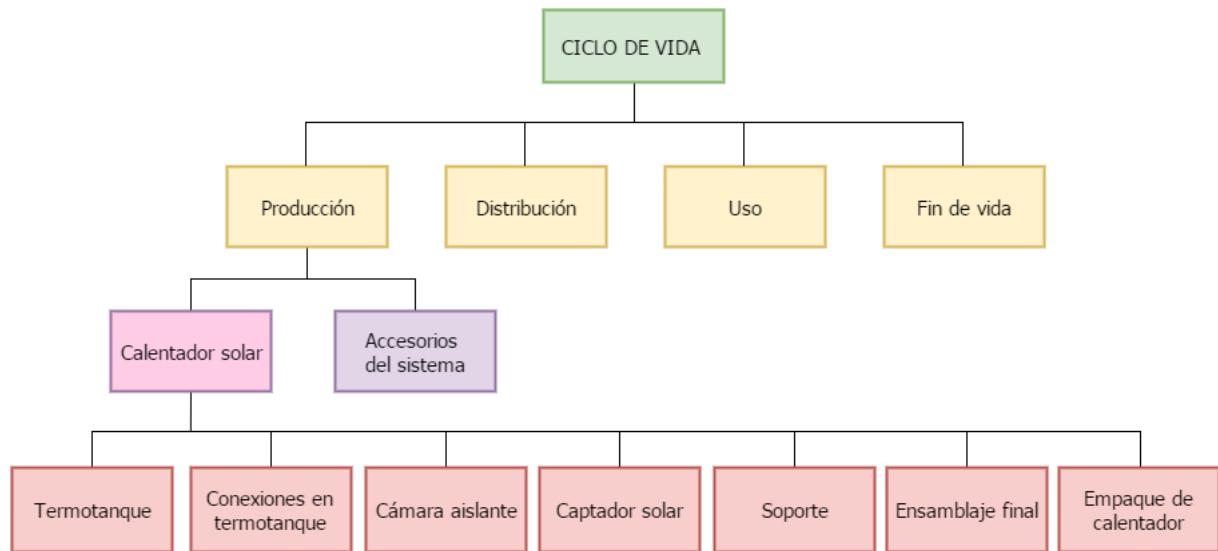


Figura 16. Componentes del ciclo de vida analizado en *SimaPro*  
(Fuente: Elaboración propia)

## 6.1. Evaluación del impacto del escenario base

Según los resultados de evaluación del impacto (Figura 17), la etapa de producción genera más efectos al medioambiente. Su resultado en cada categoría supera el 50%. Desde su valor más alto de 98,5% que se coloca en la categoría de la toxicidad humana, hasta su valor más bajo de 69,5% en la categoría de cambio climático. La fase de manufactura afecta más al agotamiento de recursos naturales así como en la salud humana y el daño a los ecosistemas.

En segundo lugar está la fase de uso, con los procesos de operación y mantenimiento. Se refleja más en la categoría de cambio climático con la cifra de 16% y en lo menos en la ecotoxicidad terrestre con 0,7%.

La etapa de la disposición final ocupa el tercer lugar en la importancia de impactos. Su cantidad más grande se ve en la categoría de ecotoxicidad acuática de agua dulce con la cifra de 14,5%. En la categoría de agotamiento de recursos abióticos su valor es nulo.

La fase de ciclo de vida que menos influencia tiene es la distribución. Su cantidad más alta se refleja en la categoría de la formación de oxidantes fotoquímicos, con 4,6%. En la toxicidad humana solamente ocupa un 0,3%.

La Tabla 6 representa las categorías de impacto con sus factores de caracterización, los indicadores de categoría (unidades) y los resultados numéricos del estudio. En total el potencial de calentamiento global es igual a 532,8 kg CO<sub>2</sub> eq, de los cuales en la producción se emiten 370,5 kg CO<sub>2</sub> eq, en la distribución 21,9 kg CO<sub>2</sub> eq, en la fase de uso 85,2 kg CO<sub>2</sub> eq y en el fin de vida 55,2 kg CO<sub>2</sub> eq.

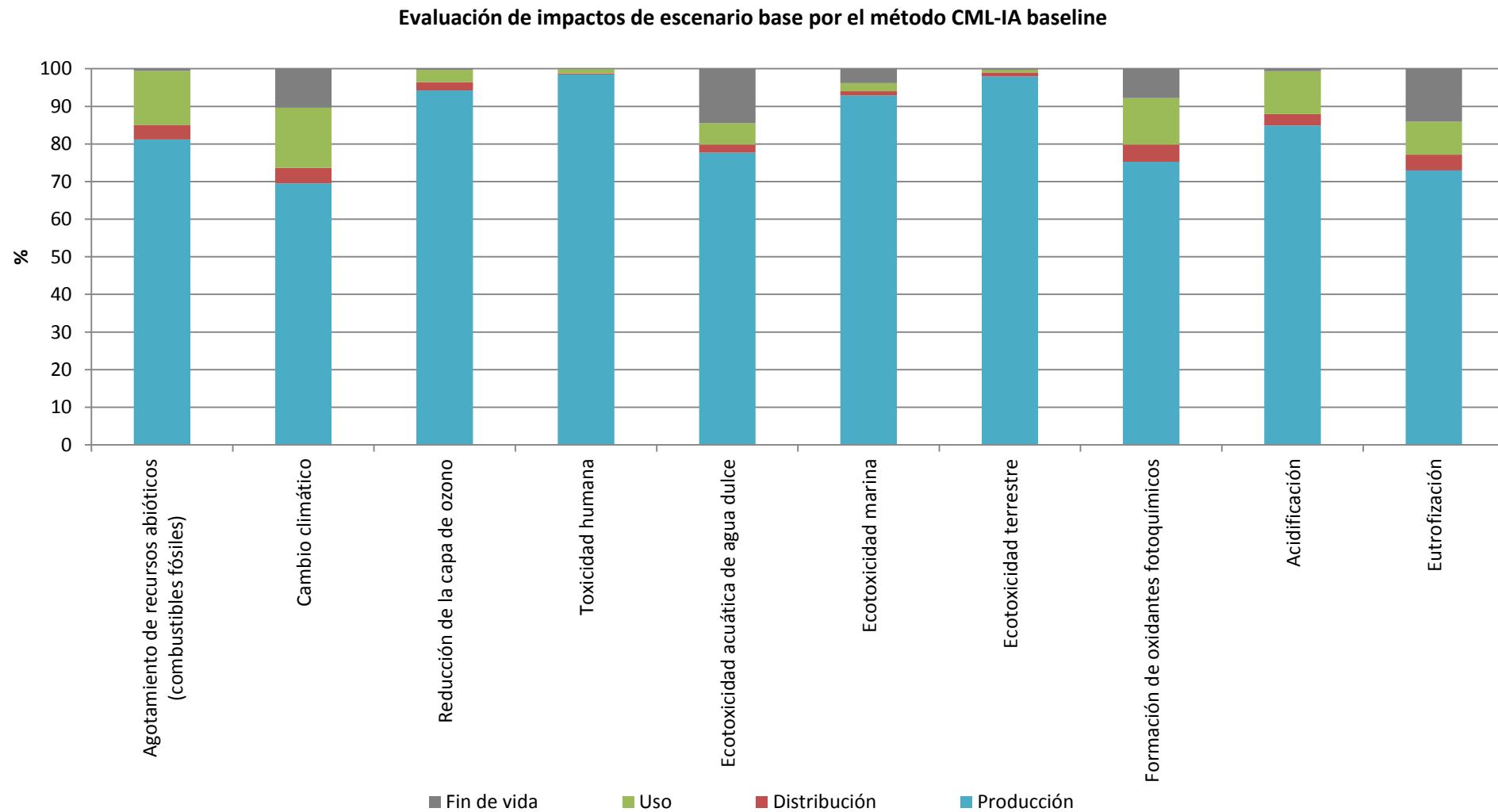


Figura 17. Resultados gráficos de la evaluación del impacto de escenario base  
(Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SimaPro*)

Tabla 6. Resultados numéricos de la evaluación del impacto de escenario base  
 (Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SimaPro*)

| Categoría de impacto                                     | Factor de caracterización | Indicador de categoría (Unidad)     | Total        | Producción   | Distribución | Uso         | Fin de vida |
|--|---------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles) | PRA                       | MJ                                  | 8 495,3354   | 6 900,0195   | 316,3853     | 1 231,0521  | 47,8786     |
| Cambio climático   | PCG                       | kg CO <sub>2</sub> eq               | 532,8137     | 370,4557     | 21,9291      | 85,2451     | 55,1837     |
| Reducción de la capa de ozono                            | PAO                       | kg CFC-11 eq                        | 0,0001       | 0,0001       | 0,0000       | 0,0000      | 0,0000      |
| Toxicidad humana   | PTH                       | kg 1,4-DB eq                        | 1 379,5319   | 1 358,6739   | 3,4910       | 15,3717     | 1,9953      |
| Ecotoxicidad acuática de agua dulce                      | PTA                       | kg 1,4-DB eq                        | 4,6152       | 3,5858       | 0,1002       | 0,2595      | 0,6697      |
| Ecotoxicidad marina                                      | PTM                       | kg 1,4-DB eq                        | 529 008,0633 | 491 272,3432 | 6 105,6491   | 11 507,4175 | 20 122,6535 |
| Ecotoxicidad terrestre                                   | PTT                       | kg 1,4-DB eq                        | 1,3559       | 1,3281       | 0,0144       | 0,0101      | 0,0033      |
| Formación de oxidantes fotoquímicos                      | PFFO                      | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq | 0,1868       | 0,1405       | 0,0086       | 0,0231      | 0,0145      |
| Acidificación  | PA                        | kg SO <sub>2</sub> eq               | 3,1850       | 2,7047       | 0,0958       | 0,3644      | 0,0201      |
| Eutrofización  | PE                        | kg PO <sub>4</sub> eq               | 0,3885       | 0,2834       | 0,0161       | 0,0342      | 0,0547      |

A continuación se muestran los resultados del inventario de los gases de efecto invernadero. La Tabla 7 enseña los valores de cada tipo de gas en cada etapa del ciclo de vida del estudio. El gas más emitido es el dióxido de carbono, con un total de 453,8 kg. El segundo resultado más alto es para el metano con el valor de 4,2 kg. El siguiente es el óxido nitroso, para el cual en el software aparece con el término de óxidos de nitrógeno y su cantidad es de 1,2 kg. La cifra del gas de hexafluoruro de azufre es muy poca, solamente  $1,85 \times 10^{-5}$  kg. Los gases de hidrofluorocarbonos y perfluorocarbonos no aparecen el resultado del análisis.

Tabla 7. Resultados numéricos de emisiones de gases de efecto invernadero del estudio  
(Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SimaPro*)

| Gas de efecto invernadero       | Producción (kg) | Distribución (kg) | Uso (kg) | Fin de vida (kg) | Total (kg) |
|---------------------------------|-----------------|-------------------|----------|------------------|------------|
| CO <sub>2</sub>                 | 340,4105        | 20,9837           | 74,8001  | 17,6261          | 453,8204   |
| CH <sub>4</sub>                 | 1,4953          | 0,0325            | 0,4196   | 2,2807           | 4,2281     |
| N <sub>x</sub> O <sub>y</sub> * | 0,9369          | 0,0909            | 0,1439   | 0,0149           | 1,1866     |
| HFC                             | 0,0000          | 0,0000            | 0,0000   | 0,0000           | 0,0000     |
| PFC                             | 0,0000          | 0,0000            | 0,0000   | 0,0000           | 0,0000     |
| SF6                             | 1,56E-05        | 5,65E-07          | 2,14E-06 | 1,60E-07         | 1,85E-05   |

\*En el inventario de *SimaPro* no aparece el término de N<sub>2</sub>O.

En la Tabla 8 se presenta el desglose en porcentaje de los mismos gases dependiendo de la fase del ciclo de vida. La fase de producción contiene más cantidad de los gases: el 75% de CO<sub>2</sub>, el 35% de CH<sub>4</sub>, el 79% de N<sub>x</sub>O<sub>y</sub> y el 84% de SF6. En la disposición final el metano CH<sub>4</sub> tiene un valor superior al 50%, el resto de porcentajes no son significativos. En la etapa del uso las cantidades están en el rango de 10-20% y en la distribución bajan a menos que 10%.

Tabla 8. Resultados porcentuales de emisiones de gases de efecto invernadero del estudio  
(Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SimaPro*)

| Gas de efecto invernadero       | Producción (kg) | Distribución (kg) | Uso (kg) | Fin de vida (kg) | Total (kg) |
|---------------------------------|-----------------|-------------------|----------|------------------|------------|
| CO <sub>2</sub>                 | 75%             | 5%                | 16%      | 4%               | 100%       |
| CH <sub>4</sub>                 | 35%             | 1%                | 10%      | 54%              | 100%       |
| N <sub>x</sub> O <sub>y</sub> * | 79%             | 8%                | 12%      | 1%               | 100%       |
| HFC                             | 0%              | 0%                | 0%       | 0%               | 0%         |
| PFC                             | 0%              | 0%                | 0%       | 0%               | 0%         |
| SF6                             | 84%             | 3%                | 12%      | 1%               | 100%       |

\*En el inventario de *SimaPro* no aparece el término de N<sub>2</sub>O.

Revisando con más detalle la fase de fabricación, en la cual se consideran el colector solar y los accesorios del sistema, se conoce cual componente del producto genera más impactos. La siguiente evaluación es solamente del colector solar (Figura 18).

El componente de mayor impacto es el captador solar. En la categoría de toxicidad humana conlleva el 73,8% y en la de agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles) el 19%. Desempeña el papel más importante en los daños a la salud humana, ecosistemas y en los recursos naturales.

El segundo componente más influyente es el termotanque. Su cantidad más alta está en la categoría de agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles) con el 53,7%. El valor más bajo está en la categoría de toxicidad humana con 4%.

Luego se ubica la cámara aislante. Su mayor cantidad está en la categoría de ecotoxicidad marina con el 19,8%, su menor cantidad está en la toxicidad humana con el 1,9%.

La suma de estos componentes representa cerca del 80% del impacto en cada categoría. Las otras piezas no influyen mucho, porque las tres mencionadas predominan en los resultados. Las menos significativas son las conexiones en termotanque, después el empaque del colector, el ensamblaje final y el soporte.

En la Tabla 9 se observan todas las categorías de impacto con los valores de factores de caracterización. Fijándose en el cambio climático, se obtiene que en total el colector emite 280,2 kg CO<sub>2</sub> eq. El componente que más kg de CO<sub>2</sub> eq produce es el termotanque con la cifra de 115,9 kg CO<sub>2</sub> eq. Para los otros elementos los valores en los indicadores de categorías son los siguientes: 70,6 kg CO<sub>2</sub> eq del captador solar, 52,8 kg CO<sub>2</sub> eq de la cámara aislante, 16,1 kg CO<sub>2</sub> eq del ensamblaje final, 15,7 kg CO<sub>2</sub> eq del soporte, 9,0 kg CO<sub>2</sub> eq del empaque de colector y 0,1 kg CO<sub>2</sub> eq de las conexiones en termotanque.

### Evaluación de impactos de colector solar por el método CML-IA baseline

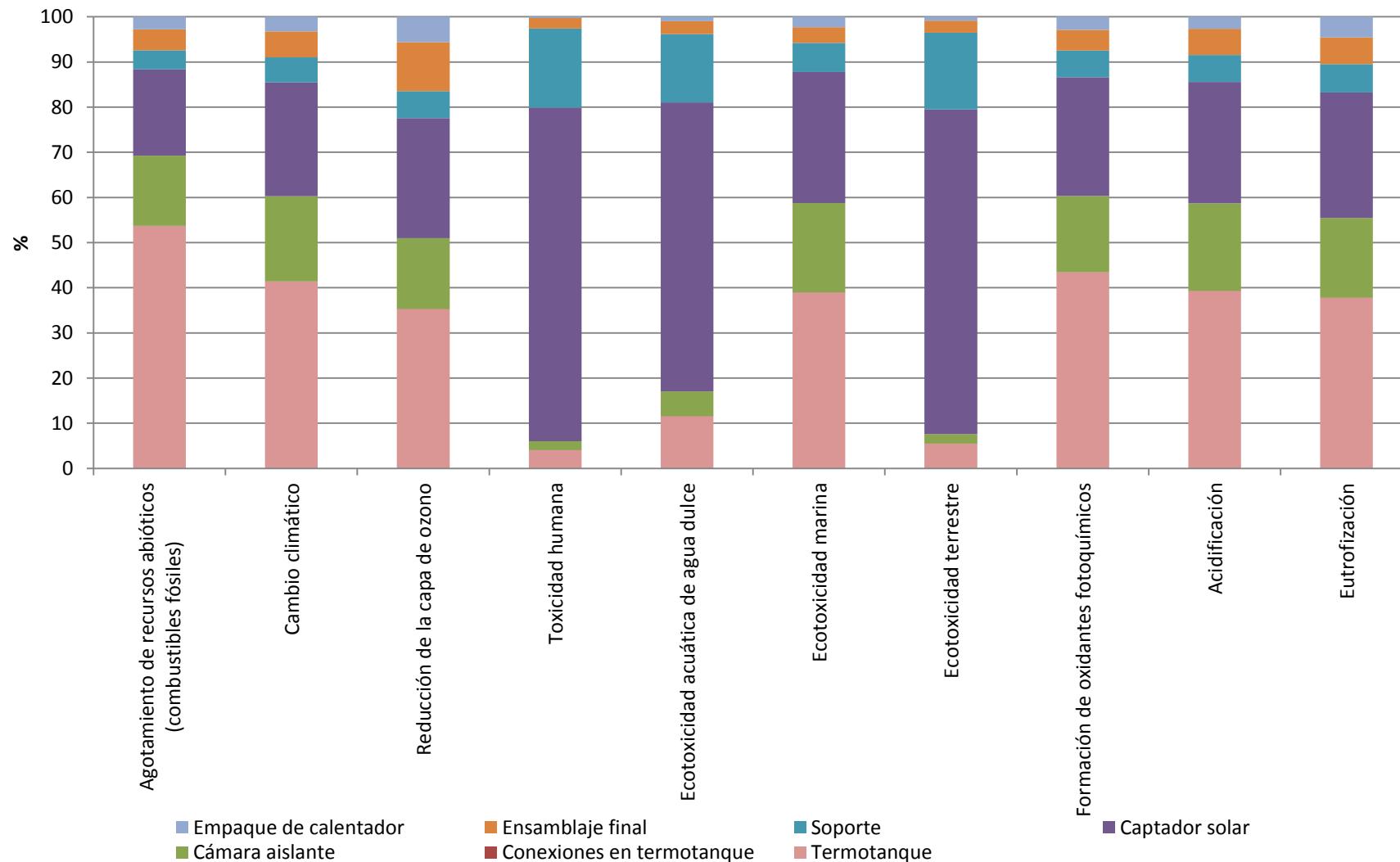


Figura 18. Resultados gráficos de la evaluación del impacto del colector solar  
(Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SimaPro*)

Tabla 9. Resultados numéricos de la evaluación del impacto del colector solar  
(Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SimaPro*)

| Categoría de impacto                                     | Factor de caracterización | Indicador de categoría (Unidad)     | Total        | Termostanque | Conexiones en termostanque | Cámara aislante | Captador solar | Soporte     | Ensamblaje final | Empaque de colector |
|--|---------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|----------------------------|-----------------|----------------|-------------|------------------|---------------------|
| Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles) | PRA                       | MJ                                  | 4 788,2105   | 2 569,1495   | 3,1809                     | 744,7055        | 912,7630       | 204,5662    | 222,2200         | 131,6253            |
| Cambio climático   | PCG                       | kg CO <sub>2</sub> eq               | 280,1573     | 115,8567     | 0,1498                     | 52,7789         | 70,5729        | 15,7023     | 16,0700          | 9,0267              |
| Reducción de la capa de ozono                            | PAO                       | kg CFC-11 eq                        | 0,0000       | 0,0000       | 0,0000                     | 0,0000          | 0,0000         | 0,0000      | 0,0000           | 0,0000              |
| Toxicidad humana   | PTH                       | kg 1,4-DB eq                        | 1 400,8260   | 56,6394      | 0,0263                     | 27,4451         | 1 035,2255     | 245,5057    | 32,4193          | 3,5648              |
| Ecotoxicidad acuática de agua dulce                      | PTA                       | kg 1,4-DB eq                        | 302,1110     | 34,8951      | 0,0154                     | 16,4663         | 193,4254       | 45,7442     | 8,6305           | 2,9341              |
| Ecotoxicidad marina                                      | PTM                       | kg 1,4-DB eq                        | 772 753,5218 | 301 272,4091 | 31,6447                    | 152 839,4412    | 224 014,5572   | 50 060,8945 | 26 793,9250      | 17 740,6502         |
| Ecotoxicidad terrestre                                   | PTT                       | kg 1,4-DB eq                        | 1,2874       | 0,0706       | 0,0000                     | 0,0269          | 0,9257         | 0,2189      | 0,0345           | 0,0107              |
| Formación de oxidantes fotoquímicos                      | PFFO                      | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq | 0,0936       | 0,0406       | 0,0000                     | 0,0158          | 0,0246         | 0,0055      | 0,0043           | 0,0027              |
| Acidificación  | PA                        | kg SO <sub>2</sub> eq               | 1,7130       | 0,6732       | 0,0004                     | 0,3317          | 0,4605         | 0,1024      | 0,0995           | 0,0452              |
| Eutrofización  | PE                        | kg PO <sub>4</sub> eq               | 0,4144       | 0,1567       | 0,0001                     | 0,0731          | 0,1152         | 0,0259      | 0,0245           | 0,0190              |

## 6.2. Análisis de escenarios

El escenario base se compara con el segundo escenario, donde cambia la fase de la disposición final. En el otro caso se planea el reciclado de: polietileno (PE), plásticos, policloruro de vinilo (PVC), cartón, aluminio, acero y hierro. El método de evaluación sigue siendo el que se ha usado anteriormente, o sea CML-IA baseline.

Como se observa en la Figura 19, en cuatro categorías de impacto las diferencias entre los escenarios son mayores que 50%. Casi 95% se coloca en la ecotoxicidad marina, donde en el caso de reciclado los kg de 1,4-diclorobenceno equivalente son muchos más bajos. En la categoría de agotamiento de recursos abióticos con la especificación de combustibles fósiles, la diferencia se representa con 70% a favor del reciclado, porque disminuye la energía usada en MJ, debido a que la extracción de recursos se limita por volver a usar los desechos tratados. En la formación de oxidantes fotoquímicos los kg de etileno C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> equivalente baja a 58%. En la categoría de calentamiento global, la diferencia entre los gases de efecto invernadero emitidos, da un valor por encima del 50% en los kg de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> equivalente. En el escenario base el valor es de 532,8 kg CO<sub>2</sub> eq, en el escenario con reciclado son 264,0 kg CO<sub>2</sub> eq.

Las variedades más grandes entre los resultados se ven también en la categoría de impacto de eutrofización con el valor de casi 32%, en la acidificación con casi 29% y en la ecotoxicidad acuática de agua dulce con casi 23%.

Las diferencias menos significativas, por debajo del 10%, representan las siguientes categorías: toxicidad humana (4%), reducción de la capa de ozono (3%) y ecotoxicidad terrestre (menos que 1%). En la Tabla 10 están todos los resultados numéricos de esta comparación de escenarios.

### Comparación de impactos de escenarios diferentes por el método CML-IA el baseline

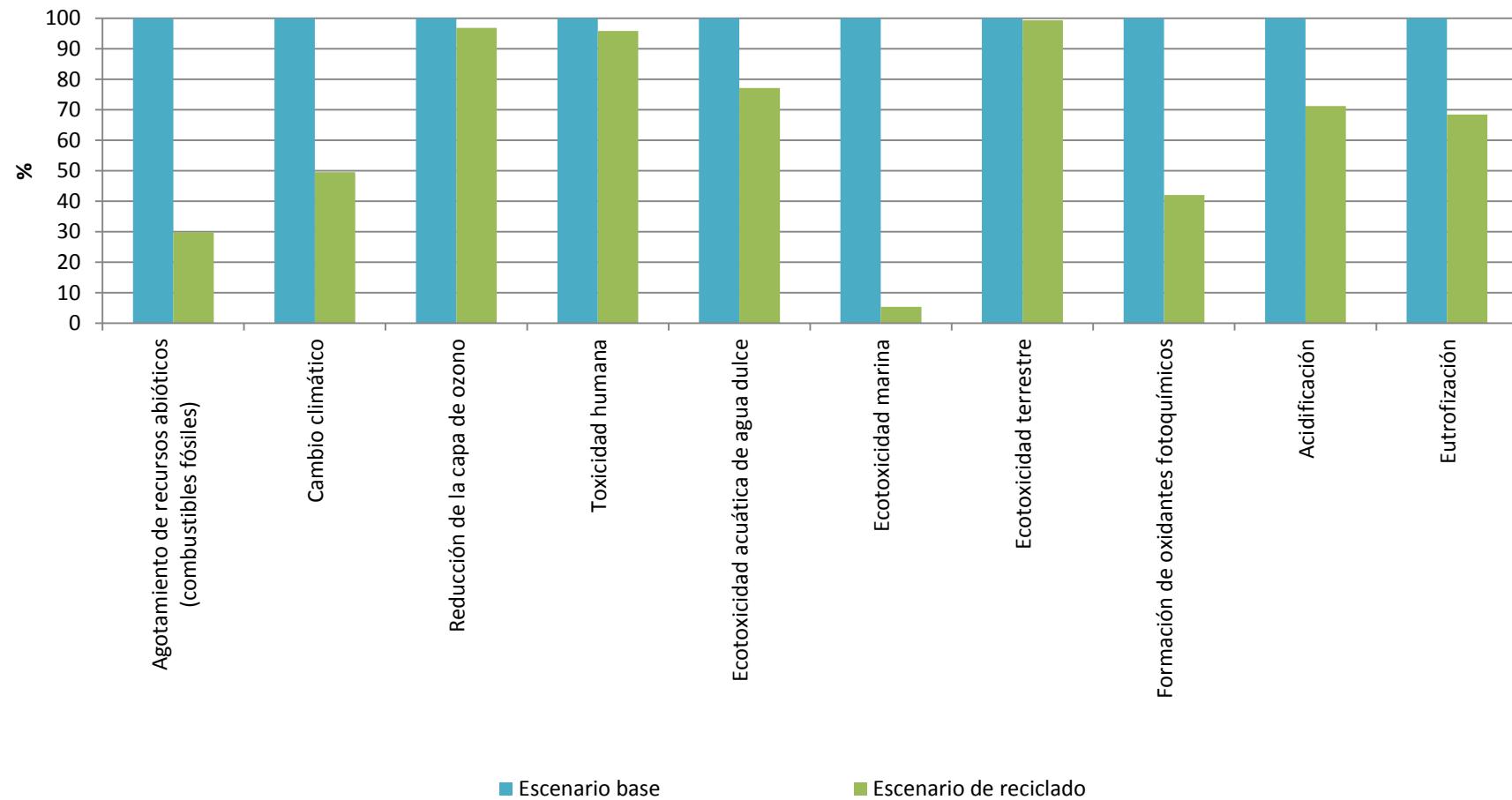


Figura 19. Comparación de resultados del escenario base con el escenario de reciclado  
(Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SimaPro*)

Tabla 10. Comparación de resultados del escenario base con el escenario de reciclado  
 (Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SimaPro*)

| Categoría de impacto                                     | Factor de caracterización | Indicador de categoría (Unidad)     | Escenario base | Escenario de reciclado | Diferencia (%) |
|--|---------------------------|-------------------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles) | PRA                       | MJ                                  | 8 495,3354     | 2 528,7477             | <b>70,2</b>    |
| Cambio climático   | PCG                       | kg CO <sub>2</sub> eq               | 532,8137       | 264,0262               | <b>50,5</b>    |
| Reducción de la capa de ozono                            | PAO                       | kg CFC-11 <sub>eq</sub>             | 0,0001         | 0,0001                 | <b>3,2</b>     |
| Toxicidad humana   | PTH                       | kg 1,4-DB <sub>eq</sub>             | 1 379,5319     | 1 321,6548             | <b>4,2</b>     |
| Ecotoxicidad acuática de agua dulce                      | PTA                       | kg 1,4-DB <sub>eq</sub>             | 4,6152         | 3,5607                 | <b>22,9</b>    |
| Ecotoxicidad marina                                      | PTM                       | kg 1,4-DB <sub>eq</sub>             | 529 008,0633   | 28 356,8886            | <b>94,6</b>    |
| Ecotoxicidad terrestre                                   | PTT                       | kg 1,4-DB <sub>eq</sub>             | 1,3559         | 1,3476                 | <b>0,6</b>     |
| Formación de oxidantes fotoquímicos                      | PFFO                      | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq | 0,1868         | 0,0784                 | <b>58,0</b>    |
| Acidificación  | PA                        | kg SO <sub>2</sub> eq               | 3,1850         | 2,2663                 | <b>28,9</b>    |
| Eutrofización  | PE                        | kg PO <sub>4</sub> eq               | 0,3885         | 0,2658                 | <b>31,6</b>    |

### 6.3. Verificación del análisis de integridad y de coherencia

En el proceso de verificación de integridad, se comprueba que la información requerida de las etapas del estudio esté completa para poder concluir el análisis. En este caso no existen vacíos de datos, todo está completo. La información está de acuerdo con la definición del objetivo y el alcance. No hay que tomar ninguna medida. En la Tabla 11 está el resumen de esta verificación.

Tabla 11. Resumen de la verificación del análisis de integridad  
(Fuente: Elaboración propia en base de ISO 140044)

| Etapa del ciclo de vida | Descripción en el inventario | ¿Completo? | Acción requerida |
|-------------------------|------------------------------|------------|------------------|
| Producción              | Sí                           | Sí         | Ninguna          |
| Distribución            | Sí                           | Sí         | Ninguna          |
| Uso                     | Sí                           | Sí         | Ninguna          |
| Fin de vida             | Sí                           | Sí         | Ninguna          |

El otro tipo de verificación, que es la verificación de coherencia, examina si las suposiciones, los métodos y los datos se relacionan en forma coherente para resumir el estudio. Como presenta la Tabla 12 no hay ningún obstáculo para realizar la fase de interpretación.

Tabla 12. Resumen de la verificación del análisis de coherencia  
(Fuente: Elaboración propia en base de ISO 140044)

| Verificación                        | Referencia      | ¿Coherente? | Acción requerida |
|-------------------------------------|-----------------|-------------|------------------|
| Fuente de datos                     | Línea de diseño | Sí          | Ninguna          |
| Exactitud de los datos              | Buena           | Sí          | Ninguna          |
| Antigüedad de los datos             | Tres meses      | Sí          | Ninguna          |
| Cobertura tecnológica               | Patente         | Sí          | Ninguna          |
| Cobertura relacionada con el tiempo | Reciente        | Sí          | Ninguna          |
| Cobertura geográfica                | México          | Sí          | Ninguna          |

## 7. Interpretación del estudio

### 7.1. Interpretación de la evaluación del impacto

Los resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida indican claramente que la etapa con mayores efectos es la producción. Dentro de ella se consideran tanto los materiales, junto con el transporte desde los proveedores, como la energía aplicada para su manufactura. En general el ciclo de vida analizado no tiene la cantidad de emisión de los gases de efecto invernadero muy elevado, el valor es igual a 532,8 kg CO<sub>2</sub> eq. De esta parte 280,2 kg CO<sub>2</sub> eq corresponde solamente al colector solar.

Estudiando más la fase de producción resulta que el componente que más afecta es el captador solar. Esto se debe a que la placa colectora de acero inoxidable tiene un peso de más que 13 kg y la pintura captadora de polímero de silicona, que viene de New Jersey de EE.UU., afectan mucho a la categoría del agotamiento de recursos abióticos, además de la toxicidad humana, la ecotoxicidad acuática de agua dulce y la ecotoxicidad terrestre. Se recomienda encontrar una alternativa de la pintura captadora con un proveedor más cercano.

El otro componente más influyente al medioambiente es el termotanque. Para hacerlo se necesitan muchas piezas de diferentes materiales. El más pesado es el polietileno de alta densidad con más de 22 kg, además viene de un sitio bastante alejado, Monterrey. Los otros son: el aislante térmico elastomérico, el aislante de poliuretano, los tubos de aluminio, la parafina como material de cambio de fase, la pintura sanitizada y el disolvente xilol. La distancia para el transporte de ellos no es representativa debido a que la mayoría provienen del estado de Guanajuato, donde son utilizados. El termotanque conlleva su mayor afectación en la categoría de agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles), en la formación de oxidantes fotoquímicos y en el cambio climático. Bastante daño causa con la acidificación, la ecotoxicidad marina, la eutrofización, la reducción de la capa de ozono. Todo se relaciona con el tipo de material que se usa. Se recomienda sustituir el material parafina a otro tipo de material de cambio de fase, al igual que el disolvente xilol por otros productos con menor contenido de sustancias orgánicas, disminuyendo así el grado de toxicidad.

En la fase de uso es muy importante poder evitar los viajes de mantenimiento hasta el cliente, para limitar ante todo el consumo de combustible fósil y los GEI, entre otros. La solución propuesta es reemplazar los materiales de la placa de acrílico metacrilato y el aislante de espuma de poliuretano, para que puedan durar más años sin necesidad de cambio. Otra opción es incluir la metodología de reemplazo de los componentes en el manual de usuario para que el cliente se encargue de esta tarea.

Además, sería muy favorable al medioambiente incluir el proceso de reciclado en su etapa de fin de vida. La ventaja se refleja generalmente en 36,5% a favor de reciclaje considerando todas las categorías de impacto. Tratándose del cambio climático, el beneficio llega a 50,5%.

Generalmente con el nuevo diseño se trata de que el producto sea local, colaborando mucho en el estado de Guanajuato. Eso por supuesto ayuda a disminuir los GEI y apoya el comercio nacional.

Con este tipo de estudio se valora la fase de trabajo, porque durante el diseño aún se pueden cambiar varias ideas para poder limitar el impacto al medioambiente. Lo no favorable es que en la obtención de los materiales y sus pesos, los valores no son reales, sino estimados y calculados. Por ello pueden suceder varios errores durante el estudio.

## 7.2. Ahorro de combustible fósil

Teniendo en cuenta la vida útil del colector solar, que ha sido fijada en 15 años, se realiza el cálculo de ahorro durante estos años por no consumir el gas LP. Un boiler doméstico típico familiar en México tiene capacidad de 40 litros. Se lo suministra con un tanque de gas LP de 30 kg. El consumo promedio diario de uso de boiler se da durante un ciclo de operación que es igual a 30 minutos. Durante este ciclo se usa 1,16 kg de gas LP (la información de consumo de gas LP tomada de una ficha técnica de colector para agua de un proveedor [14], donde el consumo de boiler son 2,32 kg/h).

Con la información de arriba se calcula el consumo total de gas LP ahorrado durante los 15 años de no usar el colector convencional de agua.

$$Ahorro_{gas\ LP} = Tiempo_{operación\ evitado} * Consumo_{gas\ diario}$$

$$Ahorro_{gas\ LP} = ((11 * 365) + (4 * 366)) \text{ días} * 1,16 \text{ kg}$$

$$Ahorro_{gas\ LP} = 6\ 355,64 \text{ kg}$$

El ahorro de gas LP durante 15 años es 6 355,64 kg. En la Tabla 13 se representa los ahorros de gas LP en diferentes escenarios, variando el ciclo de operación de colector de agua y el periodo de ahorro.

Tabla 13. Ahorros de gas LP con diferentes ciclos de operación a lo largo de los años  
(Fuente: Elaboración propia)

| Ciclo de operación de calentador de agua | Tiempo de uso de calentador de agua (h) | Consumo de gas LP (kg) | Ahorro de gas LP en 5 años (kg) | Ahorro de gas LP en 10 años (kg) | Ahorro de gas LP en 15 años (kg) |
|--|---|------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1  | 0,5                                     | 1,16                   | 2 119,32                        | 4 237,48                         | 6 355,64                         |
| 2  | 1                                       | 2,32                   | 4 238,64                        | 8 474,96                         | 12 711,28                        |
| 3  | 1,5                                     | 3,48                   | 6 357,96                        | 12 712,44                        | 19 066,92                        |

Analizando el ahorro financiero de gas LP para el suministro de combustible de calentador convencional de agua durante los años de uso de colector solar se obtienen cifras bastante significativas. Dependiendo de cuantos años se evita el consumo de combustible fósil, varía el ahorro, esto se representa en la Tabla 14.

El tanque de gas LP tiene capacidad de 30 kg. Dependiendo de ciclo de operación del calentador de agua, el tanque sirve para más o para menos días de uso. El precio por kg de gas LP tiene valor de \$15,58 pesos mexicanos. El dato es un promedio de los precios vigentes en febrero de 2017 entre los distribuidores de gas licuado de petróleo en el Estado de Guanajuato [15]. El precio promedio nacional es igual a \$16,20 pesos mexicanos. El tanque de 30 kg en el Estado de Guanajuato tiene precio de \$467,4 pesos mexicanos.

Tabla 14. Ahorro en consumo de gas LP a lo largo de la vida útil del colector solar  
(Fuente: Elaboración propia)

| Año       | Consumo de gas LP con 1 ciclo de operación diario (kg) | Cantidad de tanques de 30 kg de gas LP utilizados | Precio de gas LP ahorrado (MXN) |
|-----------|--|---|---------------------------------|
| 1         | 424,56   | 14,15   | 6 614,64                        |
| 2         | 847,96   | 28,27   | 13 211,22                       |
| 3         | 1 271,36   | 42,38   | 19 807,79                       |
| 4         | 1 694,76   | 56,49   | 26 404,36                       |
| 5         | 2 119,32   | 70,64   | 33 019,01                       |
| 6         | 2 542,72   | 84,76   | 39 615,58                       |
| 7         | 2 966,12   | 98,87   | 46 212,15                       |
| 8         | 3 389,52   | 112,98  | 52 808,72                       |
| 9         | 3 814,08   | 127,14  | 59 423,37                       |
| 10        | 4 237,48   | 141,25  | 66 019,94                       |
| 11        | 4 660,88   | 155,36  | 72 616,51                       |
| 12        | 5 084,28   | 169,48  | 79 213,08                       |
| 13        | 5 508,84   | 183,63  | 85 827,73                       |
| 14        | 5 932,24   | 197,74  | 92 424,30                       |
| <b>15</b> | <b>6 355,64</b>  | <b>211,85</b>                                     | <b>99 020,87</b>                |

Resulta que si durante la vida útil del colector solar no vamos a utilizar el calentador convencional para agua a base de gas LP se pueden llegar a ahorrar \$99 020,87 pesos mexicanos. La cantidad de tanques de 30 kg de gas LP, comprados durante el periodo de 15 años casi llegan a 212. El costo total puede tiende al incremento y podría rebasar los \$100 000 pesos mexicanos a corto plazo, teniendo en cuenta que el precio de combustible fósil no es fijo, sino que aumenta con el paso de los años.

### 7.3. Tiempo de retorno de emisiones

El tiempo de retorno de emisiones es el indicador de la cantidad de emisiones evitadas por el empleo de tecnología verde en lugar del uso de combustible fósil. En este caso son los años, en los cuales los kg de los CO<sub>2</sub> eq generadas por el sistema de colector solar durante su ciclo de vida son proporcionales a los kg CO<sub>2</sub> eq emitidos por el gas LP butano durante un año de uso de un calentador convencional para agua con gas [16]. La ecuación es presentada en el siguiente modo:

$$EM_{tiempo\ de\ retorno} = \frac{EM_{ACV}}{EM_{evitadas} - EM_{operación}}$$

Donde:

$EM_{tiempo\ de\ retorno}$  – tiempo de retorno de emisiones (años)

$EM_{ACV}$  – emisiones generadas durante las etapas del ciclo de vida del sistema (kg CO<sub>2</sub> eq)

$EM_{evitadas}$  – emisiones evitadas por no usar el combustible fósil (kg CO<sub>2</sub> eq/año)

$EM_{operación}$  – emisiones generadas durante la operación del sistema (kg CO<sub>2</sub> eq/año)

Como en el caso del tiempo de retorno de energía, en el *payback* de emisiones las emisiones generadas durante la operación del sistema son nulas. No hay ningún tipo de energía que consuma el sistema durante su etapa de funcionamiento, porque para ello no es necesario nada de electricidad.

Las emisiones del sistema durante su ciclo de vida van a ser iguales al valor calculado por el software *SimaPro*. Las emisiones del cambio climático con el método de evaluación del impacto CML-IA baseline fueron determinadas en 532,8kg CO<sub>2</sub> eq.

Dejando de usar el combustible fósil para el calentamiento de agua, se dejan de gastar alrededor de 424,56 kg de gas LP butano en una casa familiar. Usando el factor de conversión para obtener las emisiones de kg CO<sub>2</sub> eq [17], se determina el valor para ahorro. El factor es igual a 2,96 kg CO<sub>2</sub> eq/ kg de gas butano. El ahorro de emisiones en un año es igual a: 1 256,70 kg CO<sub>2</sub> eq/año.

En la Tabla 15 se ve el valor de las emisiones evitadas durante los 15 años de vida del colector solar.

Tabla 15. Emisiones de kg CO<sub>2</sub> eq evitadas por años según el consumo de combustible fósil  
(Fuente: Elaboración propia)

| Año | Consumo de gas LP (kg) | Emisiones evitadas (kg CO <sub>2</sub> eq) |
|-----|------------------------|--|
| 1   | 424,56                 | 1 256,70                                   |
| 2   | 847,96                 | 2 509,96                                   |
| 3   | 1 271,36               | 3 763,23                                   |
| 4   | 1 694,76               | 5 016,49                                   |
| 5   | 2 119,32               | 6 273,19                                   |
| 6   | 2 542,72               | 7 526,45                                   |
| 7   | 2 966,12               | 8 779,72                                   |
| 8   | 3 389,52               | 10 032,98                                  |
| 9   | 3 814,08               | 11 289,68                                  |
| 10  | 4 237,48               | 12 542,94                                  |
| 11  | 4 660,88               | 13 796,20                                  |
| 12  | 5 084,28               | 15 049,47                                  |

|           |                 |                  |
|-----------|-----------------|------------------|
| 13        | 5 508,84        | 16 306,17        |
| 14        | 5 932,24        | 17 559,43        |
| <b>15</b> | <b>6 355,64</b> | <b>18 812,69</b> |

Usando los datos calculados se puede obtener el valor del tiempo de retorno de emisiones de kg CO<sub>2</sub> eq:

$$EM_{tiempo\ de\ retorno} = \frac{532,81\ kg\ CO_2\ eq}{1\ 256,70\ kg\ CO_2\ eq/año - 0}$$

$$EM_{tiempo\ de\ retorno} = 0,42\ años$$

El *payback* de emisiones oscila alrededor de 5 meses. En el cálculo no se consideran las emisiones durante la etapa de transformación de la materia prima, así que el resultado del tiempo de retorno podría ser más elevado.

#### 7.4. Tiempo de retorno de energía

El tiempo de retorno de energía es el indicador para la evaluación del eco-rendimiento de la instalación de energía renovable. Es un tiempo necesario en el cual el colector solar colecta la energía equivalente a la energía utilizada para producirlo [16]. Se expresa en la siguiente forma:

$$E_{tiempo\ de\ retorno} = \frac{E_{ACV}}{E_{ahorrada} - E_{operación}}$$

Donde:

$E_{tiempo\ de\ retorno}$  – tiempo de retorno de energía (años)

$E_{ACV}$  – energía consumida durante las etapas del ciclo de vida del sistema (kJ)

$E_{ahorrada}$  – energía anual ahorrada vs. combustible fósil (kJ/año)

$E_{operación}$  – energía usada durante la etapa de operación del sistema (kJ/año)

El calentamiento de agua depende solamente de la energía solar. La energía de operación del sistema de colector solar no consume energía. Los fenómenos de termosifón y de circulación por gravedad a presión atmosférica suceden naturalmente. Así que el término  $E_{operación}$  es nulo.

La energía de las etapas del ciclo de vida es la energía utilizada en los procesos de la manufactura y la energía utilizada para el transporte. El valor necesario para la fabricación es igual a 6 001,2 kJ. Para el transporte se necesitan 4,78 l de gasolina. Su energía se calcula usando el poder calorífico inferior (PCI). El PCI de la gasolina mexicana “Magna” es 31 176 kJ/l [18]. Multiplicando los valores se obtiene que la energía usada en el transporte se determina en 149 021,28 kJ.

La energía ahorrada de uso de colector solar es el consumo de gas LP en una casa familiar evitado en un año. Este valor es igual a 424,56 kg de gas LP. Con el valor del PCI de butano (45 720,8 kJ/kg) [19] se considera el ahorro de energía en 19 411 222,8 kJ.

Teniendo todos los datos necesarios, se hace el cálculo del tiempo de retorno de energía:

$$E_{tiempo\ de\ retorno} = \frac{6\ 001,2\ kJ + 149\ 021,28\ kJ}{19\ 411\ 222,8\ kJ - 0}$$

$$E_{tiempo\ de\ retorno} = 0,008\ año$$

El *payback* de la energía se aproxima a tres días. Éste es un valor de retorno muy bajo, porque durante el ciclo de vida del colector solar el uso de energía es poco. Hay que tener en cuenta que en los cálculos no se considera la energía usada para el reciclado, ni la energía necesaria para la transformación de la materia prima. Con tan bajo valor de retorno se confirma que el tipo de esta tecnología es bastante buena y gasta muy poca energía para su fabricación.

## 8. Conclusiones

El estudio de análisis del ciclo de vida del colector solar con sistema de almacenamiento térmico con cambio de fase se resume en la parte de la evaluación e interpretación.

A partir de los resultados obtenidos se conoce que el modelo del colector solar conlleva varios efectos de aspecto global al medioambiente. La fase más impactante es la producción. Los gases de efecto invernadero producidos por el sistema son igual a 532,8 kg CO<sub>2</sub> eq, de esta parte 280,2 kg CO<sub>2</sub> eq corresponden directamente al colector solar y sus componentes. Las piezas más influyentes son el captador solar y el termotanque. Para disminuir los impactos evidentes es posible emplear estrategias de sustitución de componentes por otros menos perjudiciales, además de incluir información adicional importante en el manual de usuario para autonomía del cliente, logrando disminuir su dependencia del fabricante en el mantenimiento del producto.

La idea del fabricante es colaborar con el mercado nacional, sobretodo el regional, de este modo ya existe una ventaja en cuanto a los impactos relacionados con el transporte de los proveedores.

Enfocándose en la fase del fin de vida, es importante tomar medidas con las acciones de reciclaje porque de este modo se pueden disminuir impactos de hasta 36,5% en un valor global.

Usando la instalación de la tecnología renovable se consigue ahorrar el combustible fósil. Durante la vida útil del colector solar se puede evitar el consumo de 355,64 kg de gas LP, que es igual a 18 812,69 kg CO<sub>2</sub> eq emitidos. El *payback* de emisiones da un valor aproximado a 5 meses, con lo que se confirma que el uso del colector solar es muy favorable. El *payback* de energía es aún más amigable dando el resultado de solamente tres días.

El análisis de ciclo de vida es una herramienta de alta confiabilidad en el desarrollo sostenible. Con un método de evaluación de impacto adecuado a las expectativas de los objetivos y alcances del estudio, se obtiene la información deseada para las mejoras y recomendaciones para el producto y el medioambiente. Gracias a ella se consigue optimizar los recursos y generar modelos con alto grado de innovación tecnológica que ayuden en la mejora continua de la sustentabilidad.

## Anexo A

### A.1. Fases del ACV

Según la Norma ISO 14044 [5] en el estudio de ACV se distinguen cuatro fases:

1. La fase de definición del objetivo y el alcance.

El inicio de definición del estudio, depende del tema y también del uso previsto del análisis realizado. Los detalles del estudio pueden diferenciarse en base al objetivo supuesto por el estudio.

2. La fase de análisis del inventario.

Significa recopilar y evaluar las entradas, las salidas y los impactos ambientales de un sistema. Los datos coleccionados cumplen con el objetivo definido en la primera fase.

El procedimiento del inventario de ciclo de vida (ICV) se refleja en la Figura 20.

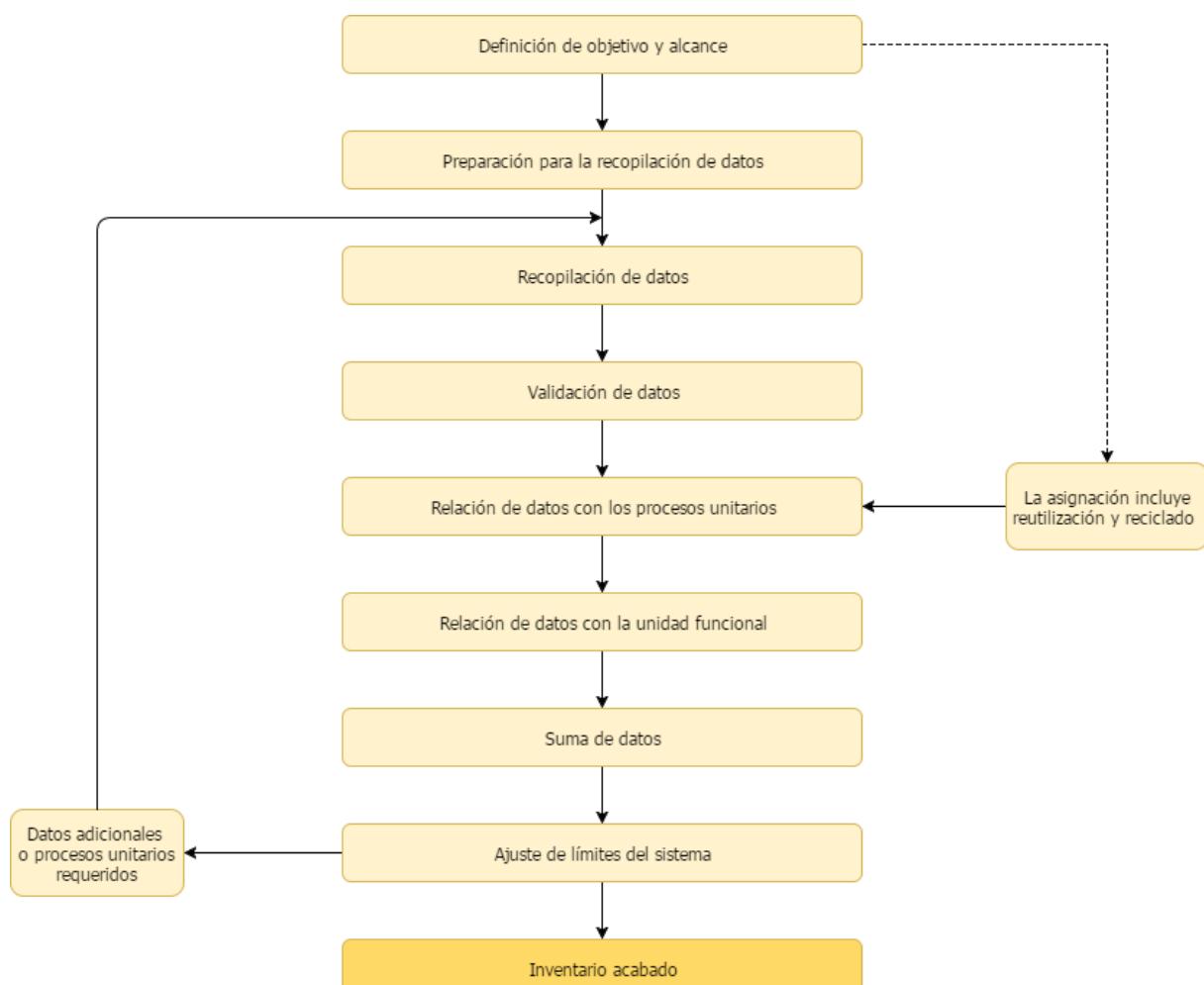


Figura 20. Procedimiento de análisis de inventario  
(Fuente: Elaboración propia basado en la Norma ISO 14044 [6])

### 3. La fase de evaluación del impacto ambiental.

Es el conocimiento y evaluación de los resultados del inventario del sistema de producto, para poder entender mejor su importancia ambiental. Dentro del mecanismo ambiental se eligen las categorías de impacto y los indicadores de categoría (Figura 21).

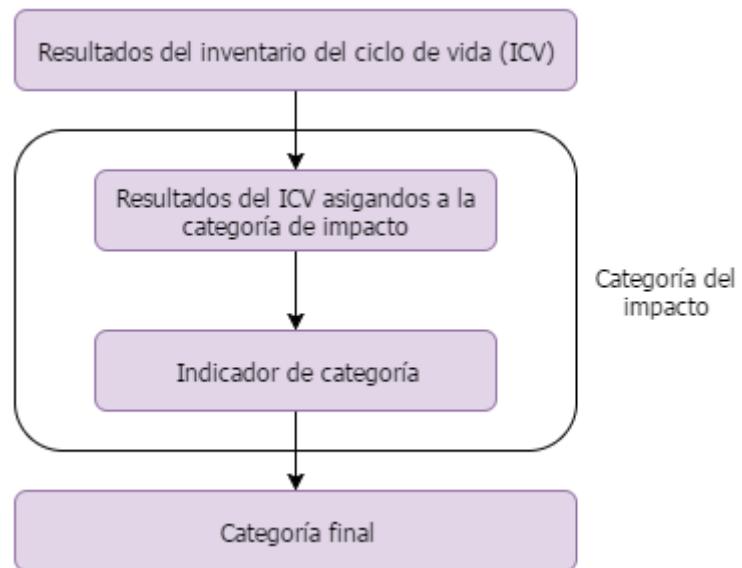


Figura 21. Concepción de indicador de categoría  
(Fuente: Elaboración propia basado en la Norma ISO 14044 [6])

### 4. La fase de interpretación.

En la última fase se resumen los resultados del análisis del inventario o de la evaluación del impacto ambiental, o de ambos, para relacionarlos con la primera fase de ACV y sacar las recomendaciones y conclusiones (Figura 22).

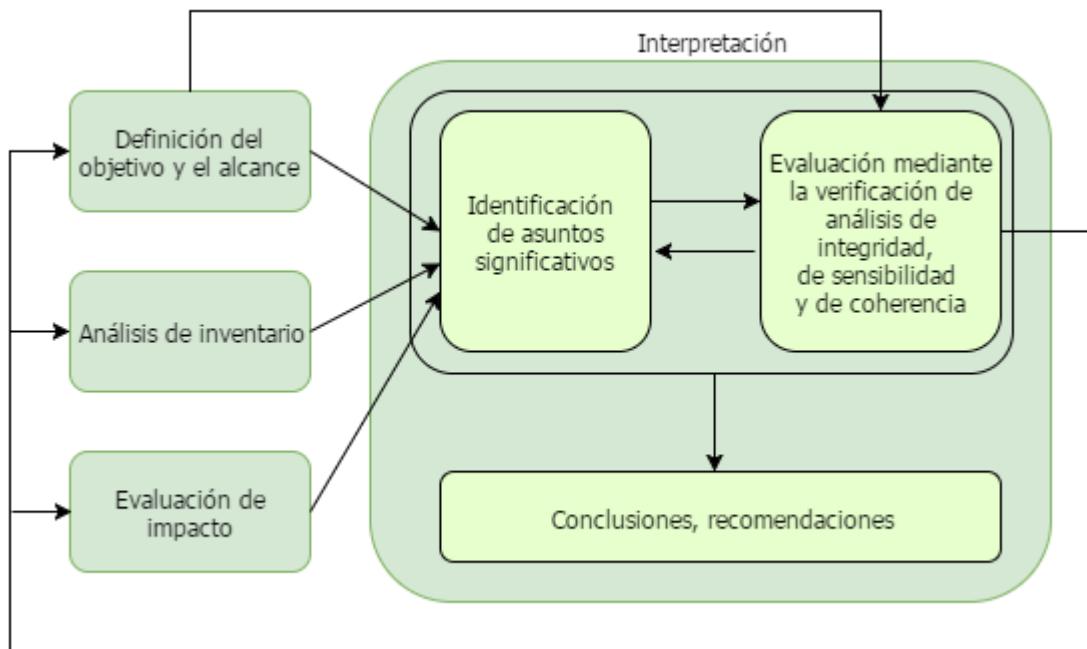


Figura 22. Fase de interpretación relacionada con otras fases de estudio  
(Fuente: Elaboración propia basado en la Norma ISO 14044 [6])

## A.2. Alcance del ACV

El sistema del producto conlleva la información de procesos unitarios con flujos elementales, junto con los flujos de producto. Los límites del sistema definen cuáles procesos unitarios entran dentro del sistema o ya no son tomadas en cuenta durante el ACV. Existen diferentes alcances en el estudio de ACV (Figura 23) que definen los sistemas. Se diferencian los siguientes alcances [20] [21]:

- De la cuna a la cuna (ing. *cradle to cradle*)  
Es el análisis cíclico, empezando desde la extracción de materia prima, pasando por todas las etapas de vida y reintroduciéndolo de nuevo al ciclo o entrando a uno diferente, después de reciclaje del producto.
- De la cuna a la tumba (ing. *cradle to grave*)  
Se realiza el estudio desde la obtención de la materia prima hasta su última fase de vida. Trata la etapa de transporte, manufactura, distribución, uso y mantenimiento, hasta la disposición final y/o reciclaje.
- De la puerta a la tumba (ing. *gate to grave*)  
Se limita al análisis desde la salida de la fábrica de producción del producto hasta su fin de vida, o sea disposición final y/o reciclaje.

- De la cuna a la puerta (ing. *cradle to gate*)

Es el estudio usado para las declaraciones y reportes ambientales. El sistema se define desde la extracción de recursos hasta la etapa de fabricación incluida.

- De la puerta a la puerta (ing. *gate to gate*)

El estudio realizado tiene por alcance únicamente los procesos productivos de la empresa.

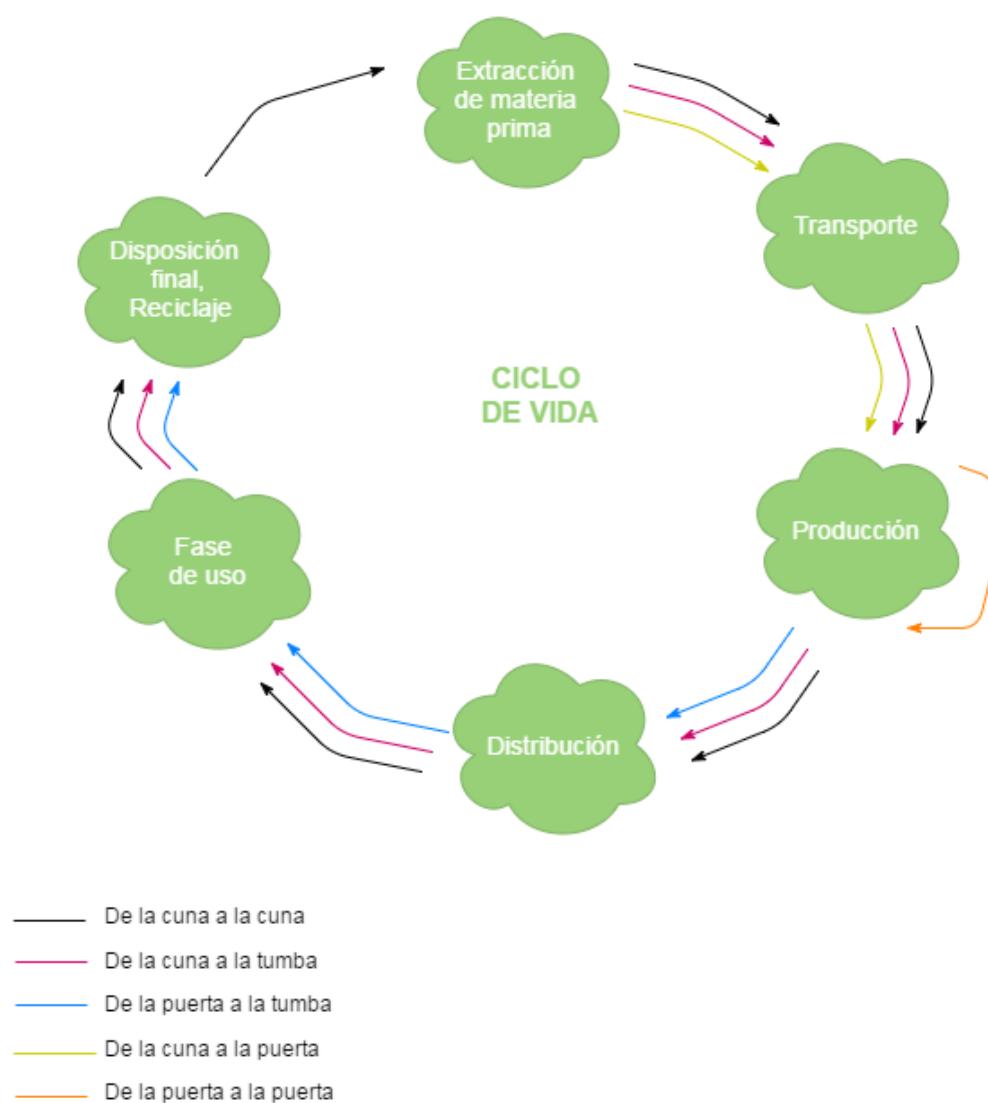


Figura 23. Diferentes alcances de ciclo de vida  
(Fuente: Elaboración propia)

## Anexo B

### B.1. Metodología de estudio

Hoy en día existen diferentes software para los cálculos de análisis de ciclo de vida. Las herramientas más utilizadas son: *GaBi*, *SimaPro*, *OpenLCA*. También existen otros programas relacionados con ACV: *Eco-it*, *Air.e LCA*, *TEAM*, *UMBERTO*, pero son menos específicos.

En el estudio se emplea la herramienta *SimaPro* [22], por ser adecuada para el departamento de diseño. Analiza y compara complejos productos haciendo despiece de los materiales y procesos involucrados en ciclo de vida. Este software es desarrollado por la empresa holandesa *PRé Consultants* [23]. Su logo se representa en la Figura 24. En la herramienta se puede trabajar con diferentes bases de datos. Unas son bibliográficas, como *Ecoinvent* y las otras están creadas por el mismo usuario como bases de datos de inventario propio.



Figura 24. Logo de software *SimaPro*  
(Fuente: [www.simapro.com](http://www.simapro.com) [24])

La base de datos *Ecoinvent* [13] es un trabajo de diferentes instituciones suizas, dando la garantía de su esfuerzo para crearla y mejorarla con el tiempo. En general es muy completa en los datos de segundo plano que son necesarios para la realización del estudio. Su versión 3 posee nuevos datos, con alcances específicos por país.

En el estudio se usa la base de datos *Ecoinvent 3*, específicamente el modelo de sistema de asignación predeterminado (en inglés: *allocation default system model*). Este tipo de modelo está basado en dos decisiones metodológicas. Una de ellas dice que el modelo usa el suministro medio de los productos, como se ha especificado en el conjunto de datos de la actividad del mercado. El suministro medio significa que el modelo no utiliza restricciones debido a los mercados y la tecnología. El producto, el material o el servicio pueden proporcionarse siempre. En el caso de modelo consecuente (en inglés: *consequential model*) es diferente, porque el suministro de productos es restringido. Lo que diferencia también este modelo es que utiliza la asignación para convertir el conjunto de datos de varios productos al otro conjunto de datos de un solo producto.

### B.2. Métodos de evaluación de impacto

La herramienta *SimaPro* contiene diferentes métodos de evaluación de impacto [12], los cuales se usan para calcular los resultados de impactos medioambientales. Los métodos se clasifican como: europeos, norteamericanos, de cuestión única, de huella hídrica, y de métodos ya sustituidos por otros más actualizados (Tabla 16).

Tabla 16. Métodos de evaluación de impacto disponibles en el software *SimaPro*  
(Fuente: *SimaPro Database Manual Methods Library*, PRé, April 2016 [12])

| MÉTODOS                  |                 |                             |   |                          |
|--------------------------|-----------------|-----------------------------|---|--------------------------|
| Europeos                 | Norteamericanos | Cuestión única              | Huella hídrica                            | Sustituidos              |
| CML-IA                   | BEES            | CUMULATIVE ENERGY DEMAND    | BOULAY ET AL 2011 (HUMAN HEALTH)          | CML 1992                 |
| ECOLOGICAL SCARCITY 2013 | TRACI 2.1       | ECOSYSTEM DAMAGE POTENTIAL  | BOULAY ET AL 2011 (WATER SCARCITY)        | ECO-INDICATOR 95         |
| EDIP 2003                |                 | GREENHOUSE DAMAGE POTENTIAL | ECOLOGICAL SCARCITY 2006 (WATER SCARCITY) | ECO-INDICATOR 99         |
| EPD (2013)               |                 | GREENHOUSE GAS PROTOCOL     | HOEKSTRA ET AL 2012 (WATER SCARCITY)      | ECOPoints 97             |
| EPS 2000                 |                 | IPCC 2013                   | MOTOSHITA ET AL 2011 (HUMAN HEALTH)       | EDIP/UMIP 97             |
| IMPACT 2002+             |                 | SELECTED LCI RESULTS        | PFISTER ET AL 2009 (ECO-INDICATOR 99)     | IPCC 2001 GWP            |
| RECIPE                   |                 | USETOX                      | PFISTER ET AL 2009 (WATER SCARCITY)       | IPCC 2007                |
| ILCD 2011 MIDPOINT+      |                 |                             | PFISTER ET AL 2010 (RECIPE)               | EPD (2008)               |
|                          |                 |                             | BERGER ET AL 2014, WAVE (WATER SCARCITY)  | ECOLOGICAL SCARCITY 2006 |
|                          |                 |                             |   | ECOLOGICAL FOOTPRINT     |

El método empleado en este estudio es CML-IA. Fue creado en el año 2001 por CML Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden en Holanda, quienes propusieron un grupo de categorías de impacto y métodos de caracterización para la fase de la evaluación de impacto. Existen dos versiones de este método en la herramienta de *SimaPro*. Una se llama “baseline”, método base con diez categorías de impacto. La otra es una versión ampliada “non-baseline”, incluyendo otras categorías de impacto y variaciones de las categorías de impacto de la versión base (por ejemplo diferenciando los marcos de tiempo). A continuación se nombra las diez categorías de impacto que forman parte del método base.

Las categorías de impacto de CML-IA baseline son:

1. Agotamiento de recursos abióticos

Esta categoría considera la protección del bienestar humano, la salud humana y la salud del ecosistema. El indicador está relacionado con la extracción de los minerales y combustibles fósiles debido a las entradas del sistema. El factor es determinado

para cada extracción de minerales y combustibles fósiles. La unidad son: kg de antimonio Sb equivalente/ kg de extracción o MJ para los combustibles fósiles. El alcance geográfico es a escala global.

## 2. Cambio climático

Está relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero. Influencia en la salud humana y de ecosistema, también a la conservación de los materiales. Los factores de caracterización están definidos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático IPCC (de inglés: *Intergovernmental Panel on Climate Change*). El factor es el potencial de calentamiento global durante 100 años GWP100 (GWP viene de inglés: *Global Warming Potential*). Se expresa en: kg de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>/ kg de emisión. El alcance geográfico es a escala global.

Los gases de efecto invernadero (GEI) se expresan como el CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> eq). Los GEI según el Protocolo de Kioto son:

CO<sub>2</sub> dióxido de carbono – es responsable de la temperatura constante dentro de la tierra. Emitido por uso de combustible fósil y el cambio de uso de suelo (deforestación).

CH<sub>4</sub> metano – se produce en la combustión de combustible fósil. Además se emite en los pozos de petróleo, las minas de carbón al aire libre, los cultivos de arroz, por la digestión alimenticia de los animales, etc.

N<sub>2</sub>O óxido nitroso – se forma en la combustión de vehículos motorizados con *Diesel* y el uso de fertilizantes nitrogenados.

HFC hidrofluorocarbonos – se produce por la actividad humana en el uso de los disolventes para los aerosoles, refrigerantes y dispersores de espuma en el sector doméstico e industrial.

PFC perfluorocarbonos – producido por la actividad humana en la obtención de aluminio de electrólisis.

SF<sub>6</sub> hexafluoruro de azufre – producido por la actividad humana en la obtención de magnesio.

## 3. Reducción de la capa de ozono

Junto con la reducción del ozono de la estratosfera, a la superficie de la Tierra llega más radiación ultravioleta B, UV-B. Este tipo de radiación tiene resultados dañinos para la salud humana y de los animales, los ecosistemas terrestres y acuáticos, los ciclos bioquímicos y los materiales. El modelo de caracterización es fijado por la Organización Meteorológica Mundial WMO (de inglés: *World Meteorological Organization*). La unidad del potencial de agotamiento del ozono se expresa en: kg de triclorofluorometano CFC-11 equivalente/ kg de emisión. El alcance geográfico está a escala global. El espacio de tiempo es infinito.

#### 4. Toxicidad humana

Consiste en los efectos causados por las sustancias tóxicas al entorno humano. Los riesgos causados en el entorno de trabajo no están incluidos. Se calcula con USES-LCA (Sistema Uniforme para la Evaluación de Sustancias para ACV, del inglés: *Uniform System for the Evaluation of Substances for LCA*), determinando el destino, la exposición y los efectos de las sustancias para un panorama de tiempo infinito. Para cada sustancia tóxica el factor del potencial de toxicidad humana HTP (de inglés: Human Toxicity Potentials) está representado en: kg de 1,4-diclorobenceno (1,4-DB)/kg de emisión. El alcance geográfico está a escala local o global.

#### 5. Ecotoxicidad acuática de agua dulce

Esta categoría representa el impacto sobre el agua dulce de los ecosistemas. Es el resultado de las emisiones de las sustancias tóxicas al aire, agua y al suelo. El factor se expresa en: kg de 1,4-diclorobenceno (1,4-DB)/kg de emisión. Se calcula con USES-LCA, determinando el destino, la exposición y los efectos de las sustancias para un panorama de tiempo infinito. El alcance geográfico puede ser a escala local, regional, continental o global.

#### 6. Ecotoxicidad marina

Se refiere a los impactos de sustancias tóxicas en los ecosistemas marinos. El factor se determina en: kg de 1,4-diclorobenceno (1,4-DB)/kg de emisión. El alcance geográfico puede ser a escala local, regional, continental o global.

#### 7. Ecotoxicidad terrestre

Se trata de los impactos de sustancias tóxicas en los ecosistemas terrestres. El factor se expresa en: kg de 1,4-diclorobenceno (1,4-DB)/kg de emisión. El alcance geográfico puede ser a escala local, regional, continental o global.

#### 8. Formación de oxidantes fotoquímicos

Es la formación de las sustancias reactivas, principalmente ozono, que se emiten al aire. Son nocivos para la salud humana y los ecosistemas, también pueden perjudicar los cultivos. El problema está relacionado con el smog de verano. El smog de invierno no se considera en el alcance de esta categoría. El indicador se calcula con el modelo de trayectoria UNECE (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa, de inglés: *United Nations Economic Commission for Europe*) y su unidad se representa en: kg de etileno C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> equivalente/ kg de emisión. El período de tiempo es de 5 días. El alcance geográfico puede ser a escala local o continental.

#### 9. Acidificación

En esta categoría se trata de los impactos de las sustancias acidificantes, que provocan grandes daños en el suelo, las aguas subterráneas, las aguas superficiales,

los organismos, los ecosistemas, construcciones y materiales. El potencial de acidificación para las emisiones al aire se calcula con el modelo RAINS 10, incluyendo el destino y la deposición de sustancias acidificantes. La unidad se describe con: kg de dióxido de azufre  $\text{SO}_2$  equivalente/ kg de emisión. El período de tiempo es infinito y su alcance geográfico puede estar a escala local o continental.

## 10. Eutrofización

Considera los impactos de excesos de macronutrientes en el medio ambiente, causados por las emisiones de nutrientes al aire, agua y suelo. El factor se basa en el procedimiento estequiométrico de Heijungs (1992) y se presenta en: kg de fosfatos  $\text{PO}_4$  equivalente/ kg de emisión. El período de tiempo es infinito y su alcance geográfico puede estar a escala local o continental.

Las categorías mencionadas se clasifican en tres áreas de protección. En la primera, de consumo de recursos naturales, está el agotamiento de recursos abióticos. En los daños a la salud humana se incluyen: reducción de la capa de ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad acuática de agua dulce, ecotoxicidad marina, ecotoxicidad terrestre, formación de oxidantes fotoquímicos y acidificación. En el último, los daños a los ecosistemas, se encuentran: cambio climático, reducción de la capa de ozono, ecotoxicidad acuática de agua dulce, ecotoxicidad marina, ecotoxicidad terrestre, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación y eutrofización.

El método CML-IA non-baseline tiene las siguientes categorías de impacto disponibles, sin contar las categorías del método base:

- Calentamiento global (diferentes marcos temporales)
- Límite superior del calentamiento global neto
- Límite inferior del calentamiento global neto
- Reducción de la capa de ozono (diferentes marcos temporales)
- Toxicidad humana (diferentes marcos temporales)
- Ecotoxicidad acuática de agua dulce (diferentes marcos temporales)
- Ecotoxicidad acuática marina (diferentes marcos temporales)
- Ecotoxicidad terrestre (diferentes marcos temporales)
- Ecotoxicidad del sedimento marino (diferentes marcos temporales)
- Promedio europeo (kg de  $\text{NO}_x$  eq), Promedio europeo (kg de  $\text{SO}_2$  eq)
- Competencia territorial
- Radiación ionizante
- Oxidación fotoquímica, Oxidación fotoquímica (bajo  $\text{NO}_x$ )
- Aire maloliente
- Reactividad incremental de igualdad de beneficios
- Máxima reactividad incremental, Máxima reactividad incremental de ozono

## Bibliografía

- [1] Naciones Unidas, *Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización*, Nueva York 2016  
<http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/71/1> [Consulta 17.01.2017]
- [2] CINU Centro de Información de las Naciones Unidas, Objetivos de Desarrollo Sostenible  
<http://www.cinu.mx/temas/objetivos-de-desarrollo-sosten/> [Consulta 17.01.2017]
- [3] INECC Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, *Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030*  
[http://www.inecc.gob.mx/descargas/adaptacion/2015\\_indc\\_esp.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/adaptacion/2015_indc_esp.pdf)  
[Consulta 17.01.2017]
- [4] SENER Secretaría de Energía, *Balance Nacional de Energía 2015*, México 2016  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177621/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2015.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177621/Balance_Nacional_de_Energ_a_2015.pdf) [Consulta 16.01.2017]
- [5] Norma UNE-EN ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- [6] Norma UNE-EN ISO 14044:2006 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- [7] The International EPD® System  
<http://www.environdec.com/> [Consulta 13.01.2017]
- [8] Patente No. MX/a/2016/017304, Título de la Invención: *Calentador solar con sistema de almacenamiento térmico, usando materiales compuestos y acelerador de convección natural*.
- [9] Patente No. MX/a/2016/017314, Título de la Invención: *Pila térmica a partir de haz de tubos para el almacenamiento de calor con materiales de cambio de fase a diferentes temperaturas de fusión*.
- [10] Secretaría de Economía, Gobierno de la República  
<https://www.gob.mx/presidencia/articulos/logo-hecho-en-mexico> [Consulta 15.01.2017]
- [11] Conejo Hernández Francisco Javier, Tesis de Maestría: *Sistema de Almacenamiento Térmico con Cambio de Fase, aprovechando Energías Alternas, Arreglo Placa-Canal, Uso Semi-Industrial*, Universidad de Guanajuato 2012
- [12] PRÉ various authors, *SimaPro Database Manual Methods Library*, April 2016  
<https://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>  
[Consulta 11.01.2017]
- [13] Ecoinvent Database  
<http://www.ecoinvent.org/> [Consulta 13.01.2017]

[14] Ficha técnica de calentador para agua a base de gas LP  
<http://www.leflam.com.mx/assets/-ft-110-042-calentador-de-paso.pdf>  
[Consulta 1.03.2017]

[15] Precios al público de gas LP reportados por los distribuidores  
<http://www.gob.mx/cre/documentos/precios-al-publico-de-gas-lp-reportados-por-los-distribuidores> [Consulta 1.03.2017]

[16] Ardente Fulvio, Beccali Giorgio, Cellura Maurizio, Lo Brano Valerio; *Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances*; Renewable Energy 2004

[17] *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)*; Generalitat de Catalunya Comisión Interdepartamental Cambio Climático, 2011  
<http://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531>  
[Consulta 1.03.2017]

[18] Caballero-Mata P., Castillo-Hernández P., Mendoza-Domínguez A., *Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diésel mexicanos reformulados con Etanol*. Ingeniería Investigación y Tecnología, 2012  
[http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplares/V13N3/V13N3\\_art04.pdf](http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplares/V13N3/V13N3_art04.pdf)  
[Consulta 1.03.2017]

[19] Gobierno de España. Ministerio de energía, turismo y agenda digital. Secretaría de estado de energía  
<http://www.minetad.gob.es/energia/glp/Paginas/Index.aspx> [Consulta 1.03.2017]

[20] Departamento de Territorio y Sostenibilidad: Medio Ambiente  
[http://mediambient.gencat.cat/es/05\\_ambits\\_dactuacio/empresa\\_i\\_produccio\\_sostenible/estrategia\\_ecodisseny/ecodisseny/eines/eines\\_av/acv/](http://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/empresa_i_produccio_sostenible/estrategia_ecodisseny/ecodisseny/eines/eines_av/acv/)  
[Consulta 17.01.2017]

[21] Jordi Messeguer Gally, Tesis de Ingeniería: *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el Ciclo de Vida de un Calentador Solar Doméstico*, Universidad Nacional Autónoma de México

[22] *Introduction to LCA with SimaPro*, PRé: Mark Goedkoop, Michiel Oele, Jorrit Leijting, Tommie Ponsioen, Ellen Meijer, January 2016  
<https://www.pre-sustainability.com/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>  
[Consulta 11.01.2017]

[23] PRé Consultants  
<https://www.pre-sustainability.com> [Consulta 11.01.2017]

[24] SimaPro  
<https://simapro.com> [Consulta 11.01.2017]

## Bibliografía complementaria

Ardente Fulvio, Beccali Giorgio, Cellura Maurizio, Lo Brano Valerio; *Life cycle assessment of a solar thermal collector*; Renewable Energy 2004

Arnaoutakis N., Souliotis M., Papaefthimiou S.; *Comparative experimental Life Cycle Assessment of two commercial solar thermal devices for domestic applications*; Renewable Energy 2017

Di Su, Yuting Jia, Guruprasad Alva, Lingkun Liu, Guiyin Fang; *Comparative analyses on dynamic performances of photovoltaic – thermal solar collectors integrated with phase change materials*; Energy Conversion and Management 2016

Faegh M., Shafii M. B.; *Experimental investigation of a solar still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes*; Desalination 2017

Hamed M., Fallah A., Brahim A. B.; *Numerical analysis of an integrated storage solar heater*; International Journal of Hydrogen Energy 2016

Laborderie A. d., Puech C., Adra N., Blanc I., Beloin-Saint-Pierre D., Padey P., Payet J., Sie M., Jacquin P.; *Environmental Impacts of Solar Thermal Systems with Life Cycle Assessment*; World Renewable Energy Congress 2011

Lamnatou Chr., Chemisana D., Mateus R., Almeida M.G., Silva S.M.; *Review and perspectives on Life Cycle Analysis of solar technologies with emphasis on building-integrated solar thermal systems*; Renewable Energy 2014

Naghavi M.S., Ong K.S., Badruddin I.A., Mehrali M., Metselaar H.S.C.; *Thermal performance of a compact design heat pipe solar collector with latent heat storage in charging/discharging modes*; Energy 2017

PRé: Mark Goedkoop, Michiel Oele, Jorrit Leijting, Tommie Ponsioen, Ellen Meijer, *SimaPro Tutorial*, January 2016

<https://www.pre-sustainability.com/download/SimaPro8Tutorial.pdf>  
[Consulta 11.01.2017]

Rey-Martínez F.J., Velasco-Gómez E., Martín-Gil J., Navas Gracia L.M., Hernández Navarro S.; *Life Cycle Analysis of a Thermal Solar Installation at a Rural House in Valladolid (Spain)*; Environmental Engineering Science 2008

SENER Sistema de Información Energética  
<http://sie.energia.gob.mx> [Consulta 13.01.2017]

Tsilingiridis G., Martinopoulos G., N. Kyriakis N.; *Life cycle environmental impact of a thermosyphonic domestic solar hot water system in comparison with electrical and gas water heating*; Renewable Energy 2003

## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Inventario de los materiales del sistema.....  | 24 |
| Tabla 2. Inventario de los materiales de empaque.....   | 28 |
| Tabla 3. Energía utilizada en la manufactura del colector solar .....                                 | 33 |
| Tabla 4. Total de residuos reciclables y no reciclables.....  | 35 |
| Tabla 5. Transporte y sus características en diferentes fases del ciclo de vida .....                 | 37 |
| Tabla 6. Resultados numéricos de la evaluación del impacto de escenario base .....                    | 41 |
| Tabla 7. Resultados numéricos de emisiones de gases de efecto invernadero del estudio ...             | 42 |
| Tabla 8. Resultados porcentuales de emisiones de gases de efecto invernadero del estudio              | 42 |
| Tabla 9. Resultados numéricos de la evaluación del impacto del colector solar .....                   | 45 |
| Tabla 10. Comparación de resultados del escenario base con el escenario de reciclado .....            | 48 |
| Tabla 11. Resumen de la verificación del análisis de integridad.....                                  | 49 |
| Tabla 12. Resumen de la verificación del análisis de coherencia .....                                 | 49 |
| Tabla 13. Ahorros de gas LP con diferentes ciclos de operación a lo largo de los años .....           | 51 |
| Tabla 14. Ahorro en consumo de gas LP a lo largo de la vida útil del colector solar.....              | 52 |
| Tabla 15. Emisiones de kg CO <sub>2eq</sub> evitadas por años según el consumo de combustible fósil.. | 53 |
| Tabla 16. Métodos de evaluación de impacto disponibles en el software <i>SimaPro</i> .....            | 62 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de grado de vulnerabilidad al cambio climático en México .....               | 7  |
| Figura 2. Desglose de consumo final energético por combustible en México en año 2015 .....  | 8  |
| Figura 3. Marco de referencia de un análisis de ciclo de vida – etapas de un ACV .....      | 11 |
| Figura 4. Logo oficial de los productos nacionales mexicanos .....                          | 13 |
| Figura 5. Modelo de diseño 3D del colector solar SATCF 3.0 en <i>SolidWorks</i> .....       | 14 |
| Figura 6. Esquema de componentes del colector solar diseñado en <i>SolidWorks</i> .....     | 16 |
| Figura 7. Esquema del sistema de estudio .....  | 17 |
| Figura 8. Principio de operación de la unidad funcional .....                               | 18 |
| Figura 9. Alcance del estudio del análisis del ciclo de vida del colector solar .....       | 21 |
| Figura 10. Despiece del colector solar presentado en <i>SolidWorks</i> .....                | 27 |
| Figura 11. Material de tanque – polietileno de alta densidad HDPE .....                     | 28 |
| Figura 12. Material de placa colectora – acero inoxidable .....                             | 29 |
| Figura 13. Material de base – acero inoxidable .....  | 29 |
| Figura 14. Termoformadora en su fase de manufactura .....                                   | 31 |
| Figura 15. Línea de producción de colector solar .....                                      | 32 |
| Figura 16. Componentes del ciclo de vida analizado en <i>SimaPro</i> .....                  | 38 |
| Figura 17. Resultados gráficos de la evaluación del impacto de escenario base .....         | 40 |
| Figura 18. Resultados gráficos de la evaluación del impacto del colector solar .....        | 44 |
| Figura 19. Comparación de resultados del escenario base con el escenario de reciclado ..... | 47 |
| Figura 20. Procedimiento de análisis de inventario .....                                    | 57 |
| Figura 21. Concepción de indicador de categoría .....                                       | 58 |
| Figura 22. Fase de interpretación relacionada con otras fases de estudio .....              | 59 |
| Figura 23. Diferentes alcances de ciclo de vida .....                                       | 60 |
| Figura 24. Logo de software <i>SimaPro</i> .....  | 61 |