

## ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UNA PLANTA DE CAPTADORES SOLARES CILINDRO-PARABÓLICOS PARA GENERACIÓN DIRECTA DE VAPOR

**Jiménez T.N.\*, García R.L.\*, Gómez C.C.\*\*\*, Zarza M.E.\*\*\***

\* Departamento de Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas.  
Universidad de La Laguna. Avda. Astrofísico Fco. Sánchez s/n, 38206, La Laguna (S/C de  
Tenerife), España. Telf.: 954 487231 Fax: 954 487233; njimenez@ull.es

\*\* Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos, Universidad de Sevilla,  
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España; carl@esi.us.es

\*\*\* Plataforma Solar de Almería. Ctra. de Senes s/n, 04200, Tabernas (Almería), España;  
eduardo.zarza@psa.es

### RESUMEN

Se presentan los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la planta solar térmica con captadores cilindro-parabólicos para generación directa de vapor, DISS (*Direct Solar Steam*), instalada en la Plataforma Solar de Almería (PSA) del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas). El ACV es una técnica de gestión medioambiental que evalúa impactos medioambientales de sistemas, procesos o productos. La Norma ISO 14040: 1997, recoge el procedimiento a seguir. El ciclo de vida se divide en 4 etapas: extracción y transformación de materias primas; transporte e instalación; puesta a punto para operar como generador de vapor y mantenimiento, y desmantelamiento. Como resultado se proponen mejoras relacionadas con cambios en los tipos de materiales y el tratamiento de las emisiones.

**PALABRAS CLAVE:** Análisis de Ciclo de Vida, ACV, Captador Cilindro-Parabólico, Energía Solar

### ABSTRACT

This paper present the results of Life Cycle Assessment (LCA) of the test thermal plant with parabolic trough collectors for direct steam generation, DISS (*Direct Solar Steam*), installed in the Plataforma Solar de Almería (PSA) of CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas). The LCA is an environmental management methodology with which the environmental impacts associate to a system, process or product are detected. The ISO standard 14040: 1997 contain the procedure to follow. The life cycle of the plant is divided in 4 stages: extraction and transformation of raw materials; transport and installation; completion of the system to operate like a steam generator and maintenance, and dismantling. As result, some improvements are recommended, mainly related to changes in the types of materials and the treatment of the emissions.

**KEYWORDS:** Life Cycle Assesment, LCA, Parabolic Trough Collector, Solar Energy

## ANTECEDENTES

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) empleada en este artículo se agrupa en las Normas UNE-EN ISO: 14040:1998, 14041:1999, 14042:2001 y 14043:2001, donde se define el ACV como: "Recopilación y evaluación de las entradas y salidas y de los potenciales impactos medioambientales del sistema del producto a lo largo de su ciclo de vida". Esta metodología se aplica a la planta solar térmica de ensayos DISS (*Direct Solar Steam*), cuyo ciclo de vida se divide en 4 fases: extracción y fabricación de materiales y componentes, instalación (incluye el transporte), puesta a punto para la operación y mantenimiento, desmantelamiento. El objetivo principal de esta aplicación es realizar un estudio exhaustivo de los materiales que componen la planta y plantear mejoras en los mismos; así como, conocer los impactos ocasionados por este tipo de tecnología.

Descripción del sistema

El campo solar consta de 11 captadores solares cilindro-parabólicos formados por módulos LS-3 y dispuestos en una sola fila de 550 m de longitud total. Los reflectores están montados sobre una estructura de acero galvanizado que permite el acople del sistema de seguimiento. Los tubos absorbedores están compuestos de acero, rodeados por una cubierta de cristal. El tubo de acero está cubierto por una superficie selectiva y la cubierta de cristal está tratada con una película antirreflectiva.

Los componentes auxiliares comprenden toda la instrumentación encargada del control de la planta y del suministro del fluido de trabajo. Los componentes más relevantes son: válvulas de control de presión, de alimentación, de recirculación; bomba principal destinada al bombeo del agua a la entrada del lazo; separadores agua/vapor; tanque de agua de alimentación y de flash, y precalentadores.

En el edificio de control se encuentran todos los sistemas de control y almacenamiento de datos. En este estudio se toma un edificio de control genérico de características y dimensiones similares al que se encuentra en la planta. Los materiales de construcción así como el mobiliario y equipos son los propios de este tipo de instalaciones.

## OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ACV

Objetivos del Estudio

El objetivo de este estudio es evaluar el impacto ambiental que origina la planta DISS en la extracción de materiales, instalación, puesta a punto para su vida útil, mantenimiento y desmantelamiento. Con objeto de que este estudio pueda resultar de interés para un grupo amplio de la comunidad científica, se considera al DISS como un generador de vapor, pudiéndole dar al vapor la aplicación industrial adecuada al producto deseado.

Alcance del Estudio

La función del sistema es la realización de experimentos relacionados con la generación directa de vapor a alta presión y temperatura en los tubos absorbedores de los captadores. Se define la unidad funcional (u.f.) como la propia planta DISS en condiciones óptimas para la operación como generador de vapor. Se considera además, que la vida útil de la

planta es de 20 años. Se define el sistema del producto como el conjunto de procesos unitarios que engloban las fases del ciclo de vida de la planta y las interrelaciona. El sistema emplea energía solar y eléctrica: la energía solar se emplea para calentar el fluido de trabajo hasta obtener vapor sobrecalentado en las condiciones de temperatura y presión deseadas; la energía eléctrica se utiliza básicamente para el bombeo de agua, control del sistema y seguimiento solar. Los límites del sistema del producto son los procesos relacionados con la obtención directa de vapor del sistema del producto.

## INVENTARIO

En la realización del programa de cálculo para la obtención de los resultados del inventario, la información sobre las entradas del inventario de ciclo de vida (ICV) ha sido recopilada (tabla 1) de las referencias CIEMAT et al. (1999) y Zarza Moya, E. (2003); se emplea como base de datos para el programa la referencia Frischknecht, R (1996).

Tabla 1. Entradas para la realización del ICV de la Planta DISS, en función de las fases del Ciclo de Vida

EXTRACCIÓN Y FABRICACIÓN DE MATERIALES Y COMPONENTES		
Facetas de los captadores	Vidrio	3,28E+04 kg/u.f.
	Plata	6,96E+01 kg/u.f.
	Cobre	5,89E+01 kg/u.f.
Tubo absorbedor y conexiones entre captadores	Acero para tubos y soportes	7,09E+03 kg/u.f.
	Cubierta de vidrio para el tubo	1,10E+03 kg/u.f.
	Sílice para la película antirreflectiva	1,94E-02 kg/u.f.
Estructura metálica	Sílice para la superficie selectiva	1,16E-02 kg/u.f.
	Estructura básica de acero al carbono	7,90E+04 kg/u.f.
	Tornillería de acero	2,46E+02 kg/u.f.
Componentes auxiliares (considerado básicamente de acero)	Molde de hierro	1,40E+04 kg/u.f.
	Válvulas de control, alimentación y recirculación	8,70E+02 kg/u.f.
	Válvulas de inyección	4,82E+02 kg/u.f.
	Bomba Principal y componentes	1,53E+03 kg/u.f.
	Separadores	2,22E+04 kg/u.f.
	Tanques	7,56E+03 kg/u.f.
	Precalentador	2,89E+03 kg/u.f.
Enfriador	2,00E+03 kg/u.f.	
Cimentación de los captadores	Hormigón	2,48E+05 kg/u.f.
	Hierro	1,63E+05 kg/u.f.
	Acero	1,68E+03 kg/u.f.
Edificio de control	Materiales comunes en la edificación	-
Otros elementos	Tuberías de acero externas	1,83E+04 kg/u.f.
	Cableado de cobre	6,36E+03 kg/u.f.
INSTALACIÓN (INCLUYE EL TRANSPORTE)		
Diesel		8,25E+06 MJ/u.f.
Electricidad		1,97E+04 MJ/u.f.
PUESTA A PUNTO PARA LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO		
Agua de trabajo	Agua	2,07E+06 kg/u.f.
	Aditivos (NH <sub>3</sub> +N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	7,99E+02 kg/u.f.
Agua para limpieza		1,14E+06 kg/u.f.
Reposición de facetas	Vidrio	1,17E+02 kg/u.f.
	Plata	4,97E+00 kg/u.f.
	Cobre	4,21E+00 kg/u.f.
DESMANTELAMIENTO		
Hormigón cimentaciones		1,13E+02 m <sup>3</sup> /u.f.
Hormigón edificación		1,76E+02 m <sup>3</sup> /u.f.

## EVALUACIÓN DE IMPACTOS DEL CICLO DE VIDA

## Clasificación y Caracterización de las Categorías de Impacto

Las categorías de impacto referentes al uso de recursos naturales son: Agotamiento de Fuentes de Energía Fósil (AFEF, en MJ); Agotamiento de Materias Primas (AMP, en kg de hierro equivalentes). Las categorías de impacto relacionadas con emisiones son: Acidificación Potencial (AP, en kg de SO<sub>2</sub> equivalentes/u.f.), Calentamiento Global (CG, en kg de CO<sub>2</sub> equivalentes/u.f.), Ecotoxicidad (ET, en m<sup>3</sup> de agua contaminada/u.f.), Producción de Residuo Sólido (RS, en kg/u.f.), Uso del Suelo (US, en m<sup>2</sup> por año/u.f.). La categoría de impacto relacionada con la salud humana que se estudia es la Toxicidad Humana (TH, en kg de peso corporal/u.f.). Para el tratamiento de los impactos se emplean las referencias: Heijungs et al., (1992a y 1992b) y Brummelen et al. (1994); que emplean la metodología de factores de caracterización. En la tabla 2 se presentan los resultados totales de la caracterización y en la Fig. 1 los porcentajes de influencia de cada una de las fases del ciclo de vida en los impactos analizados.

Tabla 2. Resultados de la Caracterización de la Planta DISS

AFEF (MJ)	AMP (kgFe <sub>eq</sub> )	AP (kgSO <sub>2eq</sub> )	CG (kgCO <sub>2eq</sub> )	ET (m <sup>3</sup> )	RS (kg)	TH (kg)	US (m <sup>2</sup> a)
1,54E+7	1,26E+8	2,43E+4	2,18E+6	3,45E+7	2,38E+6	9,73E+3	1,05E+

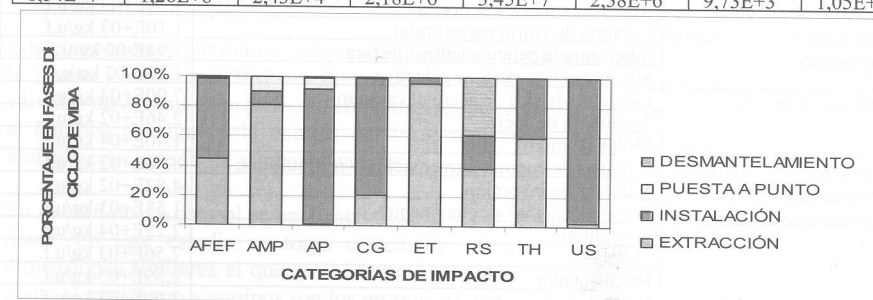


Fig. 1. Porcentajes de los resultados obtenidos para la fase de Caracterización del ACV del DISS

El AFEF está repartido entre las fases: instalación y extracción. En el primer caso debido al consumo de diesel en el transporte. En el segundo caso debido al combustible implicado en 3 procesos: fabricación de acero; extracción de arena y grava; coque empleado en la fabricación de lingotes de hierro. El AMP tiene mayor contribución en la extracción, con un 81,33%. Algunas de las materias primas estudiadas son muy abundantes en la naturaleza (hierro, arena y grava, por ejemplo) y su contribución a esta categoría de impacto, vendría dada por las grandes cantidades empleadas en el sistema. Otros materiales como el cobre y la plata no son empleados en grandes cantidades en el sistema, pero son escasos como recurso mineral. La aportación de la puesta a punto e instalación, son debidas a la reposición de materiales y a la infraestructura para transportes respectivamente. La AP está concentrada mayormente en la instalación por las emisiones causadas por el transporte tanto por carretera como ferrocarril. Los aditivos al agua de trabajo (puesta a punto) también se reflejan en los resultados finales. El CG se concentra casi en su totalidad en la instalación, asociado al transporte. La contribución en la fase de extracción es debida a las

emisiones al aire producidas en las transformaciones del hierro, acero, hormigón, cobre y vidrio. La ET (acuática) proveniente casi en su totalidad de la extracción, debida a las emisiones al agua de plomo y zinc provenientes del hierro y el acero empleado. El RS está repartido entre la extracción, instalación y desmantelamiento. Son debidos, en el primer caso a los desechos provenientes de la industria; en el segundo a la combustión de hidrocarburos en el transporte; y en el desmantelamiento a la decisión de no considerar tratamiento de residuos en los vertederos. La TH (aérea y acuática) es debida a las emisiones en la transformación de materiales (emisión de metales pesados) y al transporte. El US está concentrado básicamente en la instalación, debido a 2 motivos: el transporte (que convierte suelos cultivables y no cultivables en carreteras) y el lugar físico ocupado por la planta (en menor medida). El pequeño porcentaje obtenido para la fase de extracción se asocia al suelo empleado por la industria. La aportación de la extracción es debida a la extracción de arena y grava.

## Análisis de Sensibilidad

Se proponen cambios en las entradas del sistema que impliquen un menor impacto global en los resultados, mejoras técnicas de los materiales y el empleo de materiales con un bajo coste medioambiental. Los principales son: disminución del 18% en la estructura y el molde si se emplea el modelo EuroTHOUGH en vez de LS-3; disminución en el tamaño del edificio de control, y disminución en un 5% de la plata de los captadores.

## INTERPRETACIÓN: CONCLUSIONES Y MEJORAS

La fiabilidad de los resultados obtenidos depende tanto de los métodos de cálculo empleados como de las fuentes que han suministrado información sobre el sistema. En los métodos de cálculo se ha seguido lo indicado por las normas ISO para ACV, además se han empleado bases de datos referenciadas tanto para el inventario como para los impactos que emplean medias europeas; por tanto, los resultados obtenidos se consideran buenos para el ámbito europeo, no explícitos para España. Respecto a la fiabilidad de las fuentes, son de máxima confianza porque los datos han sido obtenidos directamente desde la propia planta. En la Fig. 2 se observa el porcentaje de disminución de cada categoría de impacto estudiada en el análisis de sensibilidad respecto a lo obtenido anteriormente para la planta. Como se concluye en la EICV, las categorías más relevantes son las relacionadas con el agotamiento de recursos y con las emisiones debidas al transporte. Con el análisis de sensibilidad, estas categorías bajan alrededor de un 10% su influencia en los resultados finales. Por tanto, las mejoras en el sistema se deben realizar en las fases de extracción e instalación, concretamente, se debe minimizar el uso de materias primas, usando reciclados; y hacer un menor uso del transporte, empleando componentes de áreas más cercanas a la planta. Además de estos hechos, se considera necesario un estudio de tratamientos de aguas residuales para la correcta eliminación de los aditivos del fluido de trabajo. Se proponen tratamientos con sistemas biológicos de nitrificación-desnitrificación, que pueden estar incluidos en la planta de pretratamiento de agua disponible en la PSA. Esto supondría una disminución de prácticamente el 10% en la acidificación potencial. Se recomienda el uso de acero aleado en lugar de hierro, pues conlleva un menor consumo energético en su fabricación y tiene menos emisiones, debido a el hierro que se emplea para el acero es reciclado de desechos, situación beneficiosa para este tipo de análisis. Hoy día existen estructuras más ligeras que el modelo LS-3 para los módulos cilindro-parabólicos. Hacer uso de este tipo de montajes reduce considerablemente el empleo de recursos. Este

aligeramiento de estructuras implica además otro en las cimentaciones de los captadores, que normalmente ya se hacen sobredimensionadas. Se recomienda además hacer estudios previos sobre la consistencia del terreno. Se recomienda el uso de materiales novedosos para construcción civil, como el cemento blanco o morteros monocapa. Incluso el uso de pintura mineral natural para el reverso de los espejos en los captadores. Se recomienda el uso de areniscas propias del terreno donde se edifica, para disminuir el empleo de combustibles fósiles por transporte. En el desmantelamiento de la planta es fundamental hacer uso del reciclaje previo al escenario de residuos. En este caso se supone únicamente que se recicla hierro (64% reciclado), acero (64%) y cobre (40%) fáciles de separar. Un buen uso del reciclado y del escenario de residuos disminuirían considerablemente los resultados obtenidos para los RS.

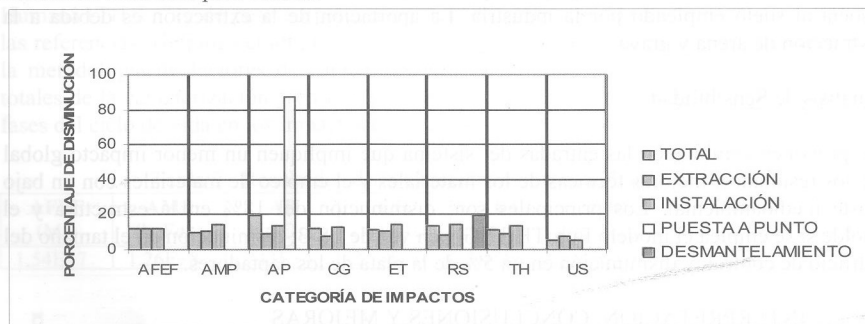


Fig. 2. Porcentaje de Disminución de las Categorías de Impacto por etapas del ciclo de vida posterior al Análisis de Sensibilidad

#### REFERENCIAS

- Brummelen, van M. et al. (1994) Methodology for the Life-Cycle Assessment of Energy Technologies. Report n° 94024. NWS (Vakgroep Natuurwetenschap en Samenleving).
- CIEMAT, et al. (1999) DISS-phase I PROJECT: Final Project Report (january, 1996 to november, 1998). CIEMAT. ISBN: 84-7834-358-x
- Frischknecht, R. et al. (1996) 'Ökoinventare von Energiesysteme'. Institute of Energy Technology. Swiss Federal Institute of Technology.
- Heijungs R. et al. (1992a) *Environmental life cycle assessment of products; Guide*. Centre of Environmental Science. ISBN: 90-5191-064-9
- Heijungs R. et al. (1992b) *Environmental life cycle assessment of products; Backgrounds*. Centre of Environmental Science. ISBN: 90-5191-064-9
- Norma UNE-EN ISO 14040 (1998). Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y Estructura (equivalente a ISO 14040:1997).
- Norma UNE-EN ISO 14041 (1999). Gestión medioambiental. ACV. Definición del objetivo y alcance y el análisis de inventario (equivalente a ISO 14041:1998).
- Norma UNE-EN ISO 14042 (2001). Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Evaluación de impacto del ciclo de vida (equivalente a ISO 14042: 2000).
- Norma UNE-EN ISO 14043 (2001). Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Interpretación del ciclo de vida (equivalente a ISO 14043: 2000).
- Zaza Moya, E. (2003). Tesis Doctoral: Generación Directa de Vapor con Colectores Solares Cilindro Parabólicos. Proyecto Direct Solar Steam (DISS).