



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Análisis de Ciclo de Vida de la captura de CO₂ en una central térmica y evaluación de alternativas basadas en energías renovables.

Autor

MIGUEL BOLEA GARCIA

Directores

LUIS MARIA SERRA RENOBALLES
IRENE BOLEA AGÜERO

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Año 2015



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).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. MIGUEL BOLEA GARCIA

con nº de DNI 17848844Q 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) Grado en Ingeniería Química, (Título del Trabajo)

Análisis del Ciclo de Vida de la captura de CO2 de una central térmica y evaluación de alternativas basadas en energías renovables.

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

Zaragoza, 18 de Septiembre de 2015

Fdo: Miguel Bolea García

Análisis de Ciclo de Vida de la captura de CO₂ en una central térmica y evaluación de alternativas basadas en energías renovables.

Resumen

En este proyecto se realiza el Análisis del Ciclo Vida (ACV), de una planta de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC) implementada en una central térmica convencional, con el objeto de evaluar los impactos ambientales asociados a su implantación en una central de generación eléctrica con combustible fósil, que en este trabajo es el lignito.

Se realizan también el ACV de la central térmica convencional y el ACV de una turbina de viento.

Para realizar los ACV, se utiliza el software SimaPro 8.02, que es una herramienta especializada para este tipo de análisis, cuyos procedimientos están estandarizados por la norma ISO 14044, 2006.

Se ha aplicado la metodología IMPACT 2002+ en todos los ACV realizados en este trabajo, en la que los resultados representan los indicadores de daño a la salud humana, a la calidad del ecosistema, a los recursos naturales (agotamiento) y la contribución al cambio climático.

El método IMPACT 2002+, que es una combinación y mejora de los métodos Eco-indicador 99 y CML 2001, utiliza indicadores de punto medio e indicadores de punto final ó indicadores de daño, proporcionando una perspectiva más completa de los daños y cargas ambientales.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos de los ACV de la central térmica con captura de CO₂ con los resultados obtenidos de la turbina de viento. Se discuten los resultados y se establecen las conclusiones oportunas.

Los resultados que se obtienen indican que la planta de captura de CO₂ permite reducir los impactos ambientales de forma muy importante con respecto a una central térmica convencional. Así, el impacto a las salud humana, a la calidad del ecosistema y al cambio climático al incluir la captura de CO₂ en una central térmica de carbón, se reducen un 98-99% de sus valores originales sin captura de CO₂.

Asimismo, cuando se compara el impacto ambiental provocado por una central térmica con captura de CO₂ con respecto al provocado por la generación eólica, se obtiene como resultado que el mayor impacto ambiental lo provoca la central térmica con captura. El mayor daño se produce a los recursos que utiliza la central térmica con captura frente a la generación eólica.

INDICE

1 INTRODUCCIÓN	3
1.1.- Antecedentes	3
1.2.- Estado del arte	4
1.3.- Objetivos del trabajo	6
1.4.- Estructura del trabajo	6
2 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA, ACV	7
2.1.-Análisis del Ciclo Vida	7
2.2.-Análisis del Inventario, AICV	7
2.3.-Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida, EICV	8
2.4.- Software: SimaPro 8.02	8
2.5.- El método IMPACT 2002+	8
3 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UNA CENTRAL TERMICA CON CAPTURA DE CO₂	10
3.1.- ACV de una central térmica de carbón	10
3.2.- ACV de una planta de captura de CO ₂ en postcombustión	12
3.3.-ACV de la planta de generación eléctrica y la planta de Captura de CO ₂ .	13
4 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UNA TURBINA EÓLICA	14
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
6 CONCLUSIONES	18
REFERENCIAS	20
ANEXO 1.-CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DEL CO₂	25
1.1.- Descripción Técnica	25
1.2. Captura de CO ₂	25
1.3.-Transporte del CO ₂	28
1.4.- Almacenamiento de CO ₂	29
ANEXO 2.- DEFINICIONES DE UNIDADES Y CATEGORIAS DE DAÑO	30
ANEXO 3.- ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS IMPACTOS	33

1. INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

El CO₂ es un gas de efecto invernadero liberado en la combustión de combustibles fósiles. Dada su abundancia, es el mayor contribuyente al cambio climático de origen antropogénico. En la actualidad las economías mundiales emiten aproximadamente, 26 Gt de CO₂ anualmente a la atmósfera. La contribución del CO₂ al cambio climático se estima en el 60% (Ramaswamy et al. 2001).

La generación eléctrica y la producción de calor con combustibles fósiles contribuyeron a las emisiones globales de CO₂ en un 35% en 2001, (Thambimuthu and Davidson, 2004). Las previsiones y la actual tendencia de las economías globales, indican que la situación empeorará, particularmente por el aumento de la demanda de energía de las grandes potencias en desarrollo como China e India.

La tecnología está jugando un papel clave para limitar las emisiones de CO₂ a la atmósfera. En este sentido, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2005) propone varias opciones:

- 1) Reducir el consumo de energía primaria, por ejemplo aumentando la eficiencia energética.
- 2) Usar combustibles alternativos, por ejemplo el gas natural en lugar del carbón
- 3) Aumentar la generación de energías renovables
- 4) Mejorar la absorción biológica del CO₂, por ejemplo, reforestación.
- 5) Capturar y almacenar el CO₂ generado, química o físicamente.

Las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC) tienen como objetivo evitar la emisión de CO₂ generado en la combustión, tanto en la industria como en las instalaciones productoras de energía. Estas tecnologías, se han clasificado tradicionalmente en tres grandes grupos. Las tecnologías de precombustión, en las que el combustible se modifica para obtener el CO₂ concentrado en la corriente de gases de salida, como por ejemplo en las centrales térmicas de gasificación integrada con ciclo combinado (IGCC).

Las tecnologías de combustión, como la oxicomustión en la que la combustión se lleva a cabo sólo con oxígeno, haciendo una separación previa del aire comburente, para obtener, de nuevo, la corriente concentrada de CO₂ para su posterior almacenamiento. Y las tecnologías de postcombustión, en las que la corriente gaseosa se trata química o físicamente aguas abajo de la producción, por ejemplo con compuestos derivados de las aminas. En la actualidad, ésta última es la tecnología más madura y viable a gran escala.

Las tecnologías de CAC tendrán que contribuir con casi la quinta parte de las reducciones de emisiones necesarias para disminuir las emisiones globales de GEI en un 50% en 2050, a un coste razonable (IEA, 2008). Las principales economías mundiales han puesto en marcha programas de desarrollo de tecnologías de CAC para lograr su despliegue comercial (ZEP, 2009). La Comisión Europea también ha propuesto una directiva que prevé el marco jurídico para la captura y almacenamiento geológico de dióxido de carbono en la Unión Europea (Comisión Europea, 2008).

Los principales factores a considerar para evaluar la viabilidad de la CAC en la mitigación del cambio climático, además de su coste, es la capacidad de reducción de emisiones y la demanda de energía primaria. Es importante considerar los aspectos sociales y medioambientales en la seguridad del almacenamiento.

En este trabajo se evalúan los aspectos ambientales de una planta de captura de CO₂ y de una central térmica convencional de vapor cuyo combustible es lignito. También se evalúan los impactos ambientales de una turbina eólica y se comparan los resultados con los de la central térmica con captura.

¿Por qué el análisis del ciclo de vida de la CAC?

Las tecnologías de captura, captan entre el 90-98% del CO₂ producido en la central térmica. Sin embargo, los procesos de captura por postcombustión, en sí mismos, tienen altos requerimientos de energía y causan una disminución en la eficiencia energética neta de la central. Esto conlleva a un mayor consumo de combustible para producir misma cantidad de electricidad, lo que conduce al aumento de las emisiones de contaminantes distintos del CO₂ procedentes de la propia combustión y otras emisiones relacionadas con la producción del combustible. En el ANEXO 1, se realiza una descripción técnica detallada del proceso de captura por postcombustión, el transporte y ulterior almacenamiento del CO₂.

Las emisiones relacionadas con los solventes (NH₃, aldehídos, vapor de disolvente, etc.) y los residuos generados en el proceso de captura de CO₂, tienen impactos ambientales negativos. Así mismo, se requiere una amplia infraestructura para el transporte y almacenamiento del CO₂. La CAC requiere el consumo de productos químicos y su correspondiente infraestructura lo que conduce a un aumento de las emisiones directas de la instalación de captura.

La aplicación de la tecnología CAC a gran escala precisa de un proceso sistemático de evaluación para todas las etapas de la CAC y de los impactos relacionados con su implantación. Una herramienta muy apropiada para evaluar los impactos ambientales de esta tecnología es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

El ACV es una metodología consolidada y aceptada por toda la comunidad científica para el análisis de los impactos ambientales a lo largo de vida del servicio, producto o tecnología considerado, es decir “desde la cuna hasta la tumba” (Guinée et al., 2001).

1.2. Estado del arte

La literatura acerca de la CAC es extensa tanto desde el punto de vista técnico como económico, por su gran relevancia en la mitigación del calentamiento global.

También hay estudios acerca del ACV que se centran en los sistemas de carbón y en particular sobre la tecnología de CAC. Una revisión de estos estudios fue presentada por Hertwich et al. (2008).

En este trabajo, se realiza una revisión actualizada del alcance de los estudios existentes sobre ACV y sistemas CAC, que se resume en la Tabla 1.

Rao et al. (2002), utilizaron un Modelo Integrado de Control Ambiental (MICA) para modelar una central térmica de carbón con numerosos controles medioambientales de contaminantes incluyendo la CAC, llegando a la conclusión de que el sistema de control de CO₂ genera nuevos productos residuales,

principalmente gas amoníaco y subproductos peligrosos, mientras que por otro lado se reducen las emisiones de partículas y de gases ácidos como SO₂, NO₂ y ClH.

Tabla 1. Revisión de la literatura en relación a las evaluaciones ambientales ACV, de la generación de energía con sistema de CAC.

Estudio	Combustible		Captura	Transporte		Almacenam.		ACV Metodologías		Emisiones	
	C	GN	PoC	T	B	G	O	Co	Ot	CO2	GEI
Rao & Rubin, 2002	X		x							x	
Lombardi, 2003	X	x	x					x		x	x
Viebahn et al. 2007	X	x	x	X		x		x		x	x
Koornneef et al. 2008	X		x								
Odeh&Cockerill,2008	X	x	x	X		x				x	x
Pehnt&Henkel, 2009	X		x	X		x		x		x	x
Korre et al. 2010	X		x					x		x	x
Veltman et al. 2010	X	x	x								
Singh et al. 2010a		x	x							x	x
Singh et al.2010b	X	x	x	X		x			x	x	x
Fayedí et al 2013		x	x					x		x	x

C: Carbón; GN: Gas Natural; PoC: Postcombustion; T: Tubería; B: Barco; G: Geológico; O: Océano; Co: Completa ACV; Ot: Otras ACV; GEI: Gases Efecto Invernadero

Lombardi, (2003) proporcionó una evaluación comparativa de los procesos de captura para diferentes configuraciones de la planta de energía, centrándose en las emisiones de CO₂ y concluyó que la central de Gasificación Integrada de Ciclo Combinado (GICC) obtenía un mayor valor para los gases de efecto invernadero con la mayoría de las emisiones que procedían de las fases de mantenimiento y operación.

Viebahn et al. (2007) utilizaron un enfoque de evaluación integrado para el ACV a nivel CAC y de otras energías renovables, teniendo en cuenta todas las tecnologías y los contaminantes más relevantes.

Koornneef et al. (2008) realizaron el ACV de dos suministros de carbón pulverizado, para una central térmica sin y con CAC y llegaron a la conclusión que los impactos más notables de la CAC fueron toxicidad humana, agotamiento de la capa de ozono y la ecotoxicidad de agua dulce.

Odeh y Cockerill (2008) examinaron las emisiones de gases de efecto invernadero de la planta de energía de combustibles fósiles con CAC a lo largo de todo el ciclo de vida.

Pehnt and Henkel (2009) presentaron el ACV para varias tecnologías de una planta de CAC de una central eléctrica de lignito.

Korre et al. (2010) compararon los análisis del ciclo de vida del sistema de generación eléctrica de carbón sin y con post-combustión de captura de CO₂, y también evaluaron solventes alternativos.

Veltman et al. (2010) calcularon los impactos medioambientales correspondientes a la captura de CO₂ de post-combustión, centrándose en las emisiones de la amina como solvente sobre los humanos y el medio ambiente.

Singh et al. (2010a) utilizaron un modelo híbrido de análisis ciclo de vida para calcular diversos impactos en la generación de electricidad a partir de una planta de gas natural con captura de CO₂ con postcombustión, considerando también el transporte y almacenamiento del CO₂.

Fayedí et al., (2013), muestran que las operaciones de captura de CO₂ llevan a un aumento en otros impactos medioambientales como la toxicidad humana, la eutrofización, acidificación y oxidación fotoquímica. Estos los atribuyen a la demanda de energía adicional de la captura de CO₂, a la infraestructura y al uso de solventes químicos.

Los estudios revisados se centran en los procesos de captura de centrales eléctricas de carbón, de gas natural de ciclo combinado, centrandó el interés por impactos como el calentamiento global, toxicidad humana, eutrofización, acidificación, utilizando metodologías como el CML 2001 cuyo enfoque es al punto medio (Guinée et al., 2001).

En este trabajo el ACV, se aborda desde la metodología IMPACT 2002+ que contempla hasta 14 categorías de impacto de punto medio que se agrupan en cuatro categorías principales de daño (enfoque al punto final): a la salud humana, a la calidad medio ambiental, a los recursos naturales y al cambio climático. Se pretende conocer los impactos a cuatro categorías de daño desde esta metodología IMPACT 2002+, que en ninguno de los estudios revisados se ha utilizado y que hemos considerado de interés su aplicación en los ACV que llevaremos a cabo

1.3. Objetivos del trabajo

En este trabajo se persiguen dos objetivos:

- Realizar un ACV de la tecnología post-combustión en la captura de CO₂ de una planta de generación eléctrica alimentada por carbón con el fin de conocer sus impactos. Para esto, es necesario adicionalmente, realizar el ACV de una central térmica convencional.
- Comparar estos impactos con los correspondientes a la energía producida por las energías renovables.

Esta comparación permitirá tener un conocimiento mas preciso de los impactos ambientales a la categoría de daño de ambos sistemas de generación eléctrica.

Como energía renovable de elección para la comparación con una central térmica con CAC, se decide la eólica ya que es la energía renovable con producción a gran escala y que genera menores impactos, (Varun et al., 2009).

1.4. Estructura del trabajo

En este Capítulo 1, se hace una revisión de los antecedentes y del estado del arte, incluyendo una revisión de la literatura acerca del ACV de las plantas de captura de CO₂, y se definen los objetivos y alcance del trabajo.

En el Capítulo 2, se describe la herramienta de evaluación del ACV siguiendo la norma ISO 14044, el software utilizado y la metodología empleada.

En el Capítulo 3, se lleva a cabo el análisis del ciclo de vida de la central térmica con captura de CO₂.

En el Capítulo 4, se realiza el análisis del ciclo de vida de una turbina eólica. En el Capítulo 5 se muestran los resultados y se discuten, y finalmente en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones.

En los anexos se amplía la información presentada en la memoria, que debido a restricciones de espacio no ha podido ser incluida en ésta, describiendo con

mayor detalle las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ (Anexo 1), las unidades y categorías de daño utilizadas (Anexo 2) y el análisis ambiental de las categorías de impacto de punto medio que amplía, refuerza y complementa el análisis de daños y las conclusiones alcanzadas en este trabajo (Anexo 3).

2. METODOLOGIA ACV

2.1. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV), es una herramienta para la evaluación medioambiental de los sistemas. El término "ciclo de vida" indica que todas las etapas de "la vida de un producto": la extracción de los recursos, fabricación, distribución, uso y disposición final, se tienen en cuenta. Por tanto, el ACV es una herramienta apropiada e idónea para la investigación de los impactos medioambientales de un producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta todos los aspectos involucrados a lo largo de todo su ciclo de vida.

Desde hace 15 años, el uso del ACV se ha desarrollado rápidamente.

Paralelamente a este desarrollo, se inició una estandarización internacional a través de la ISO 14044 (2006) que, estructura los procesos del ACV y proporciona guías para los profesionales (ISO 2006). Llevar a cabo un ACV implica cuatro pasos:

1. Definir el objetivo y el alcance. En este paso es necesaria la definición del producto, una base de cálculo (unidad funcional), los límites del sistema y el marco temporal de cada uno de los ACV.

2. Etapa del Inventario del ciclo de vida (ICV). En este paso se recogen, calculan y contabilizan todas las entradas y salidas del sistema a investigar.

Como hay que tratar con una enorme cantidad de datos en este paso, se utilizan bases de datos que contienen información acerca de las emisiones e impactos ambientales asociados a materiales, procesos de fabricación e incluso algunos equipos comunes. Para el caso de tecnologías novedosas, la única posibilidad de recoger datos a menudo es contactar con los fabricantes industriales e investigadores.

3. Análisis de los impactos del ciclo de vida (AICV). En esta etapa se calculan los daños ambientales en relación a los recursos materiales utilizados y las emisiones generadas.

4. Interpretación de los resultados. En este último paso, los resultados obtenidos se analizan y discuten como base para las conclusiones y recomendaciones.

En este trabajo se siguen los cuatro pasos especificados por la norma ISO 14044, ya que es la estructura de análisis que se acepta científicamente para poder comparar, contrastar e interpretar los datos obtenidos.

2.2. Análisis del inventario

Los inventarios se realizan, recogiendo los datos para todas las entradas: materiales, energía, etc., y las salidas: emisiones al aire/agua etc., de acuerdo con los límites del sistema, el objetivo y alcance.

En nuestro caso, para la planta de captura nos hemos basado en algunos datos de trabajos con similares características de capacidad de la planta de generación eléctrica y flujo másico (kg/h) de gas de combustión entrante en la

unidad de captura de CO₂, (Pehnt et al. 2009, Fayedí et al. 2013, Bolea I. 2006, Koornneef et al. 2008).

Para el inventario de la central térmica convencional, los datos están basados en una planta de capacidad neta de producción de 355 MW, que utiliza lignito como combustible (Spath, et al. 1999).

Para una turbina de viento de una capacidad de producción de 2 MW, los datos del inventario se han obtenido del trabajo de Martínez et al, 2009. El objetivo de la investigación de estos autores fue identificar los principales tipos de impactos ambientales durante el ciclo de vida de la turbina con el fin de lograr mejoras ambientales en la fabricación de los materiales de la misma.

2.3. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV).

El EICV, es la etapa que tiene como objetivo traducir la información sobre el uso de recursos y las emisiones de la etapa de análisis de inventario (input y output: p.e. MJ de energía fósil, g SO₂, g NO_x), en una información relevante y lo más rigurosa posible de los impactos al medio ambiente, por ejemplo, el calentamiento global, acidificación, etc.

El software que se utiliza en este trabajo es SimaPro 8.02 (LCA Software 2008. Pré Consultants, 2014, Netherlands). Al introducir los datos de entrada del proceso, SimaPro 8.02, traduce cada elemento del inventario a impactos sobre el medio ambiente, en función de la metodología que se elija. En este trabajo, se ha aplicado el método IMPACT 2002+, cuyos resultados finales indican el daño (a través de cuatro categorías de daño) a la Salud Humana, a la Calidad del Ecosistema, al Cambio Climático y al agotamiento de los Recursos Naturales.

2.4. Software: SimaPro 8.02

El software SimaPro 8.02 que se utiliza en este trabajo y que se aplica para el ACV, es la octava generación del software para el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) o Life Cycle Assessment (LCA) (LCA Software 2008. Pré Consultants, 2014). Este programa permite analizar y comparar los aspectos medioambientales de un modo sistemático y consistente. Posee unas potentes bases de datos como Ecoinvent v3.1 (Ecoinvent 3.1, 2014). Ecoinvent v3.1 es una de las más extensas bases de datos internacionales del Inventario del Ciclo de Vida (ICV).

Los datos en SimaPro están estructurados según los pasos establecidos en la norma ISO 14.044 (2006) para el ACV: Definición de objetivo y alcance, Inventario, Evaluación de impacto e Interpretación de los resultados.

En la literatura revisada, la mayoría de los autores utilizan el software SimaPro, aunque algún autor utiliza el software Umberto, que calcula y modela los flujos de materiales y energía basados en el concepto de redes de flujo de materiales (Henkel J, 2006); otro autor (Singh B, 2010), utiliza el método ReCiPe 2008, similar al IMPACT 2002+ e implementados ambos en el software SimaPro.

2.5. IMPACT 2002+

Impact Assessment of Chemical Toxics, IMPACT 2002+ es una metodología de análisis de impacto de ciclo de vida (Jolliet et al., 2003 b), que determina para cada uno de los datos recogidos en el inventario (recursos naturales consumidos y

emisiones generadas a lo largo del ciclo de vida) su contribución a cada una de las 14 categorías de impacto de punto medio, que a su vez se agrupan en cuatro categorías de daño. Un esquema de este método se representa en la Figura 1, en la que se muestra cómo se agrupan las categorías de impacto del punto medio para dar lugar a las categorías de daño ó punto final (Jolliet et al., 2003 a).

Este método, que es básicamente una combinación de la metodología del Centro de Estudios Medioambientales de la Universidad de Leiden, CML, (Guinée et al 2001) y del método Eco-indicador 99 (Goedkoop, Spriensma, 2000), toma de aquél las categorías de impacto enfocadas al punto medio y del Eco-indicador 99 las categorías de daño.

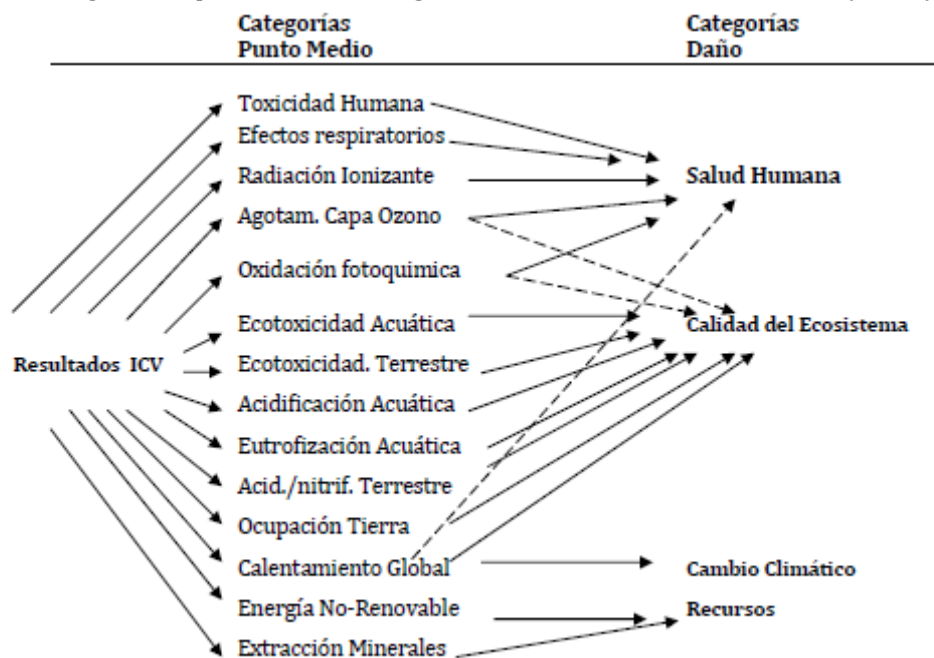
La estructura base del método es: Caracterización, Evaluación de daño, Normalización y Ponderación. Para la *Caracterización* de las categorías de impacto, una vez definidas éstas, los resultados del inventario de ciclo de vida (ICV), son asignados a cada una de las categorías de impacto. Los factores de caracterización deben reflejar la contribución relativa de un resultado del ICV al resultado del indicador de la categoría de impacto.

Cuando indicadores de la categoría de impacto se agrupan al mismo punto final o categoría de daño son definidos de tal manera que la unidad del resultado del indicador es la misma. Esto permite la suma de los resultados del indicador para cada categoría de daño y con ello la *Evaluación de Daño*, que se muestra en las tablas de resultados de nuestro trabajo.

La *Normalización* es analizar la contribución respectiva de cada impacto al daño global de la categoría de daño considerada. La normalización se realiza dividiendo el impacto (a las categorías de daño), por los respectivos factores de normalización. Estos factores son el resultado de dividir el impacto por unidad de emisión entre el impacto total de todas las sustancias de una categoría específica por persona y por año para Europa. Es decir, se considera como factor de normalización el promedio anual provocado por un habitante europeo.

La *Ponderación* es el proceso de convertir los resultados de los indicadores normalizados de las diferentes categorías de impacto en otros valores utilizando factores numéricos (factores de ponderación), basados en valoraciones subjetivas. El proceso de ponderación consiste en multiplicar los factores de ponderación por el resultado de la normalización para cada categoría de impacto. En este trabajo el criterio de ponderación empleado es 1 para todas las categorías de daño. Es decir, se considera que todas las categorías de daño tienen la misma importancia y se les asigna el mismo peso a la hora de obtener la puntuación final única.

Figura 1: Marco del esquema general del IMPACT 2002+, uniendo los resultados del AICV vía categorías de punto medio a categorías de daño, basado en Jolliet et al. (2003a).



En la Figura 1, se puede observar esquemáticamente, cómo desde los datos del inventario se llega a las categorías de impacto (Punto Medio) y éstas se agrupan para llegar a las categorías de daño (Punto Final). En este trabajo, y para todos los procesos (planta de captura de CO₂, planta de generación eléctrica con captura de CO₂ y turbina de viento), se ha utilizado el análisis y cálculo para la metodología IMPACT 2002+, con el fin de poder comparar los resultados.

3.- ACV CENTRAL TÉRMICA CON CAPTURA DE CO₂.

En este apartado se describe en primer lugar el ACV de una central térmica, después el ACV de la planta de captura de CO₂ y un tercer ACV de la central térmica implementada con la planta de captura de CO₂. Ello, nos permitirá comparar, con el ACV de la otra generación de energía renovable (eólica).

3.1.- ACV de una central térmica de carbón

Se realiza el ACV, de una planta de generación eléctrica con una capacidad de producción 355 MW, que utiliza lignito como combustible. Se aplica el procedimiento estandarizado de la norma ISO 14.044, adaptando los datos de la literatura al caso considerado.

Se ha considerado que la vida útil de la central térmica es de 25 años y 7800 horas de operación anual. Se ha considerado que el rendimiento eléctrico en la central térmica es aproximadamente del 40% y el poder calorífico inferior del lignito es de 19,75 MJ/Kg.

El inventario de los principales materiales y entradas para la central térmica se recogen en las Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2.- Inventario de los principales materiales de una planta de generación eléctrica, (Spath et al., 1999)

Material	Kg/MW de capacidad de la planta
Hormigón	158.758
Acero	50.771
Aluminio	419
Hierro	619

Tabla 3.- Entradas de materiales en la planta de generación eléctrica, (Spath et al., 1999)

Entradas	Kg/MWh electricidad producida, Vida útil
Carbón (Lignito)	448,171
Caliza	90,704

Los materiales seleccionados de la base de datos Ecoinvent 3.1 (2014) se muestran en la Tabla 4. Los materiales han sido seleccionados a nivel español (código de país ES) o europeo (código RER), siempre que ha sido posible, de la base de datos Ecoinvent 3.1.

Tabla 4.-Materiales seleccionados de la base de datos Ecoinvent 3.1, 2014.

Material	Selección en Ecoinvent
Hierro	Cast iron, at plant/RER U
Acero	Reinforcing steel, at plant/RER U
Hormigón	Concrete, exacting, at plant/CH U
Aluminio	Aluminium primary, -GLO- market/ Alloc Def, S
Carbón(Lignito)	Lignite - RER-, market/ Alloc Def, S
Caliza	Lime, hydraulic -GLO--, market/ Alloc Def, S

La unidad funcional es 1 unidad de electricidad producida. El límite del ACV es la planta de generación eléctrica. No está incluida la conexión a la red eléctrica, la subestación de transformación, ni otras infraestructuras. El enfoque de este ACV es a las categorías de daño.

En la Tabla 5, se recogen los resultados del ACV para IMPACT 2002+ de la central térmica de carbón sin captura de CO₂, para las categorías de daño, en la fase de construcción. La Tabla 6 muestra los resultados del ACV para IMPACT 2002+ de la central térmica de carbón sin captura de CO₂, para las categorías de daño, en la fase de operación. Estos resultados de puntuación única son calculados para la producción eléctrica correspondiente a 25 años de vida útil de la central térmica.

Tabla 5.- Resultados ACV, para IMPACT 2002+, puntuación única, para la Central Térmica, fase de construcción.

Categoría de Daño	Central Térmica 355MW, sin captura de CO ₂ , fase de construcción	
	Puntuación única	
	KPt	%
Salud Humana	21,1	42,20
Calidad Ecosistema	2	4,00
Cambio Climático	17	34,00
Recursos	9,9	19,80
TOTAL	50	100,00

Tabla 6.- Resultados ACV, para IMPACT 2002+, puntuación única, para producción a 25 años.

Categoría de Daño	Central Térmica 355MW, sin captura de CO ₂		
	Puntuación única		
	MPt	%	Pt/GWh, vida útil
Salud Humana	7,58	27,36	1,09E+02
Calidad Ecosistema	1,08	3,85	1,56E+01
Cambio Climático	10,9	39,2	1,57E+02
Recursos	8,2	29,60	1,18E+02
TOTAL	27,76	100,0	4,00E+02

3.2.- ACV de la planta de captura de CO₂ en postcombustión

Se realiza el ACV de la planta de captura de CO₂ (CC). Se sigue el mismo procedimiento de la norma ISO 14.044. Igualmente el enfoque de este ACV se dirige a las categorías de daño: Salud Humana, Calidad del Ecosistema, Cambio Climático y al agotamiento de los Recursos Naturales, utilizando la metodología IMPACT 2002+.

Se toma España como referencia geográfica para la generación del mix eléctrico. Se considera una planta de captura CO₂, para la tecnología de postcombustion, utilizando como solvente monoetanolamina (MEA).

El límite del sistema es el de la unidad de captura de CO₂.

La compresión del CO₂, el transporte y almacenamiento de CO₂ no están incluidos en la evaluación debido a desconocer la ubicación del lugar y la información geológica correspondiente.

La energía necesaria para la operación de la unidad de captura de CO₂ supone 77 MW. Este incremento de energía se traduce en un aumento del tamaño de la planta, para poder generar la misma potencia final. Esto conlleva un aumento de materiales de construcción y de carbón a alimentar. Los materiales para la operación especialmente el consumo de solvente y su producción están incluidos en el análisis.

Los inventarios de la planta de captura de CO₂ fueron tomados a partir de datos de diseño de procesos y referencias de literatura (Fayedi et al. 2013, Bolea I. 2006, Koorneef et al, 2008) y que se muestran en las Tabla 7 y Tabla 8.

Tabla 7.- Parámetros de la planta de captura de CO₂ (Fayedi et al.2013, Bolea I. 2006)

Parámetro	Valor	Unidad
Captura de CO ₂	840	tCO ₂ /dia
Caudal MEA	7090,3	kmol/h
Capacidad absorción disolvente	0,3	mol CO ₂ /mol MEA
Concentración MEA	30	% (en peso)
<i>Consumo de productos químicos</i>		
Carbón activo	0,075	Kg/ tCO ₂
NaOH	0,13	Kg/ tCO ₂
MEA inicial	1,5	Kg/ tCO ₂
<i>Emisiones químicas</i>		
Pérdidas MEA	0,063	Kg/ tCO ₂

Tabla 8.- Inventario de la infraestructura de la planta de captura CO₂ (Adaptado de Fayedí et al. 2013).

Equipamiento	Material	Cantidad	Unidad
Absorbedor	Acero inoxidable	12.877	Kg
Desorbedor	Acero inoxidable	10.112	Kg
Material de empaquetamiento	Mellapak (250Y)	146307	Kg
Tanque almacenamiento amina	Polietileno de alta densidad HDLPE	788,5	Kg
Tanque almacenamiento NaOH	Polietileno de alta densidad HDLPE	262,83	Kg
Tuberías y pequeño equipam.	Acero inoxidable	82.000	Kg

Los materiales seleccionados de la base de datos Ecoinvent 3.1, se recogen en la Tabla 9. Los materiales han sido seleccionados a nivel español (código de país ES) o europeo (código RER), siempre que ha sido posible, de la base de datos Ecoinvent 3.1.

Tabla9.-Materiales seleccionados de la base de datos Ecoinvent 3.1, 2014.

Material	Selección en Ecoinvent
Hierro	Cast iron, at plant/RER U
Acero	Reinforcing steel, at plant/RER U
Hormigón	Concrete, exacting, at plant/CH U
MEA	Monoethanolamina -GLO- market/ Alloc Def S
Cobre	Copper, at regional storage/RER U
Carbon activo	Carbon black -GLO- production Alloc Def S
NaOH	Sodium hydroxide -GLO- market, S
PET(tereftalato de polietileno)	Polyethylene, high density, -GLO- market U
Mellapak (250Y)	Polypropylene, GLO/Market, S

En la Tabla 10, se recogen los resultados del ACV para la planta de captura de CO₂, para las categorías de daño. Estos resultados de puntuación única son calculados para la producción eléctrica correspondiente a 25 años de vida útil de la planta de captura.

Tabla 10.-Resultados ACV, para IMPACT 2002+, puntuación única, para la vida útil de la planta de captura.

Categoría de Daño	Planta de captura de CO ₂ , vida útil	
	Puntuación única	
	Pt	%
Salud Humana	435	36,6
Calidad Ecosistema	143	12
Cambio Climático	220	18,5
Recursos	389	32,8
TOTAL	1187	99,9

3.3.- ACV de la planta de generación eléctrica y de la planta de captura de CO₂.

Con los inventarios tanto de la central térmica convencional y los de la planta de captura de CO₂, se realiza el ACV del conjunto, con el fin de comparar con la otra fuente de energía renovable. De la misma forma, se sigue el mismo procedimiento de la norma ISO 14.044. El enfoque de este ACV se dirige a las

categorías de daño, utilizando la metodología IMPACT 2002+. La unidad funcional es 1 GWh de electricidad producida.

Se ha considerado que el 100% del CO₂ es absorbido por la planta de captura.

En este ACV, se tienen en cuenta los MW que utiliza la planta de captura y que incrementa el consumo de carbón.

En la Tabla 11, se recogen los resultados del ACV de la planta de generación eléctrica y la planta de captura de CO₂ conjuntamente, para las categorías de daño. Estos resultados de puntuación única son calculados para la producción eléctrica correspondiente a 25 años de vida útil de la central y de la planta de captura.

Tabla 11.-Resultados ACV, para IMPACT 2002+, puntuación única, para la vida útil de la central y de la planta de captura.

Categoría de Daño	Central Térmica + captura de CO ₂		
	Puntuación única		
	MPt	%	Pt/GWh, vida útil (25 años)
Salud Humana	0,13	4,64	1,91
Calidad Ecosistema	0,01	0,47	0,19
Cambio Climático	0,15	5,06	2,08
Recursos	2,57	89,80	37,10
TOTAL	2,860	99,99	41,3

4.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UNA TURBINA EÓLICA.

La energía eólica produce energía eléctrica a partir de la energía cinética del viento sin producir directamente ningún tipo de contaminación ni emisiones durante el proceso de conversión, pero esto no significa que este libre de contaminación o de emisiones de CO₂. Es necesario considerar que hay impactos medioambientales debidos a los procesos de fabricación de las turbinas de viento y de sus materiales, transporte, instalación, desmantelamiento, etc. a lo largo de todo el ciclo de vida de la turbina. Este impacto ambiental es necesario cuantificarlo para comparar sus efectos de producción de energía.

Se lleva a cabo el ACV de una turbina eólica como modelo de energía renovable y así, que nos permita comparar los impactos medioambientales con una planta de generación eléctrica con captura de CO₂ en la que se utiliza combustible fósil (lignito).

Para ello, se ha tomado como referencia el trabajo de Martínez et al. 2009, en el que se estudia una turbina de viento de Gamesa modelo G8X, de 2 MW de potencia. Se aplica la norma ISO 14044 (ISO 2006), como en los casos anteriores, siguiendo la misma metodología IMPACT 2002+ y enfocada al punto final o categorías de daño (Salud Humana, Cambio Climático, Daño al Ecosistema y a los Recursos).

Dentro de los límites del sistema se encuentra la construcción de los principales componentes de la turbina, el transporte hasta el parque eólico, el montaje, e instalación, así como el desmontaje y el tratamiento de los residuos generados.

Fuera de los límites del sistema esta la distribución de la electricidad generada por la turbina, el sistema de conexión para un voltaje medio, la

subestación de transformación y el enlace a la red eléctrica nacional. La unidad funcional se define como la producción de 1 GWh de electricidad.

El inventario del ciclo de vida se ha centrado en los principales componentes que constituyen la turbina de viento: cimentación, la torre, el rotor y la góndola. Estos datos se recogen en la Tabla 12.

Tabla 12.-Inventario turbina de viento (Martínez et al. 2009)

Componentes		Materiales	Peso (ton.)
Rotor	3 palas	Resina	11,7
		Fibra vidrio	7,8
	Núcleo palas	Fund. Hierro	14
Base	Cimentación	Resina	0,19
		Fibra vidrio	0,12
Torre	3 secciones contera	Hormigón	700
		Fund. Hierro	25
Góndola	Estructura Eje principal	Acero inox.	143
		Acero inox.	15
	Transformador	Fund. Hierro	10,5
		Acero inox.	6,1
		Acero inox.	3,3
	Generador	Cobre	1,5
		Silica	0,15
Caja engranajes	Acero inox.	4,29	
	Cobre	2	
Cubierta Góndola	Silica	0,2	
	Fund. Hierro	8	
	Acero inox.	8	
	Fibra vidrio	0,8	
	Resina	1,2	

Los materiales seleccionados de la base de datos Ecoinvent 3.1, se recogen en la Tabla 13.

Tabla 13.-Materiales seleccionados de la base de datos Ecoinvent 3.1, 2014.

Material	Selección en Ecoinvent
Fibra de vidrio/resina	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection molding, at plant/RER U
Hierro	Cast iron, at plant/RER U
Acero	Reinforcing steel, at plant/RER U
Hormigón	Concrete, exacting, at plant/CH U
Silica	MG-silicon, at plant/NO U
Cobre	Copper, at regional storage/RER U

Se considera que la vida útil de la turbina de viento es de 20 años. Este es el tiempo que garantizan los fabricantes. El proceso de desmantelamiento tiene lugar después de 20 años de operación de la turbina. La producción de energía de este modelo de turbina de viento es de 4 GWh al año. Esta producción se estima sobre la base de 2000 horas a carga completa al año y es la referencia para la viabilidad económica de un parque eólico (Martínez et al., 2009).

En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos del ACV para la turbina eólica descrita, para las categorías de daño, de puntuación única.

Tabla 14.- Resultados ACV, para IMPACT 2002+, puntuación única, para la turbina de viento.

Categoría de Daño	Turbina de viento	
	Puntuación única	
	Pt	%
Salud Humana	158	45,8
Calidad Ecosistema	19,7	5,72
Cambio Climático	86,5	25,1
Recursos	80,5	23,4
TOTAL	344,7	100

5.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación de la central térmica con captura de CO₂ y la generación eléctrica eólica.

Para comparar las evaluaciones de impacto de las dos fuentes de generación eléctrica se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Considerar la totalidad de la producción eléctrica de la central térmica con captura de CO₂ a lo largo de su vida útil, 25 años.
- Considerar la misma producción de electricidad equivalente a un número determinado de turbinas de viento (parque eólico), teniendo en cuenta ajustar la vida útil de una turbina (20 años) a 25 años.

Tras estas consideraciones, el número de turbinas necesarias para producir la misma electricidad, 2000 horas a carga completa al año para la turbina (Martínez et al. 2009), y las 7800 horas al año de la central térmica con captura, es de 693 turbinas, con una ocupación estimada de terreno de 15800 Ha.

Tabla 15.- Comparación de los ACV de las dos generaciones eléctricas, puntuación única, para producción eléctrica de la vida útil de las mismas.

Categoría de Daño	Puntuación única	
	Parque eólico, 693 Turbinas	CT+ CC
	Pt/GWh, vida útil	Pt/GWh, vida útil
Salud Humana	1,97	1,91
Calidad Ecosistema	0,247	0,192
Cambio Climático	1,08	2,08
Recursos	1,01	37,1
TOTAL	4,31	41,3

CT: Central térmica. CC: Captura de CO₂

De los datos de la Tabla 15, se observa que los impactos a las categorías de daño a los recursos y al cambio climático son mayores para la central térmica con captura que para la generación eólica, considerando ambas hasta el final de su vida útil de 25 años. El mayor impacto se observa al daño a los recursos en la central térmica con captura. En puntuación total, se muestra que es aproximadamente 10 veces mayor el impacto en la central térmica con captura que en la generación eólica, pudiéndose explicar esta diferencia por el consumo de combustible fósil por la central térmica por ser un recurso no renovable.

El mayor impacto a la salud humana en la generación eólica puede explicarse a que se utilizan resinas y fibras de vidrio para la fabricación

principalmente de las palas. Estas sustancias son consideradas de alta toxicidad por el SimaPro.

Comparación en “fase de construcción” de los dos tipos de generación eléctrica.

Con esta comparación se quiere ver la evaluación de impacto a las categorías de daño en la fase exclusivamente de construcción de ambos tipos de generación eléctrica, teniendo que en cuenta que se utilizan grandes cantidades de materiales en su construcción.

En la Tabla 16, se comparan los resultados del ACV, para puntuación única, en la fase construcción de la central térmica y lo que correspondería a la construcción de un parque eólico de 693 turbinas de viento para el modelo descrito en el apartado 4. Como se observa en dicha Tabla 16, en fase construcción, los daños en todas las categorías son mucho mayores en la construcción del parque eólico que la central térmica.

Esto puede entenderse teniendo en cuenta que el daño a la salud humana tan elevado es debido a la elevada cantidad de resinas y fibras de vidrio utilizadas en las palas de la turbina. Los materiales utilizados en la construcción de las 693 turbinas tienen un gran impacto tanto al daño al cambio climático y a los recursos. Algo menor es el daño a la calidad del ecosistema, pero muy por encima al de la central térmica.

Tabla 16.- Comparación de los resultados del ACV de las dos generaciones eléctricas, puntuación única, en fase de construcción

Categoría de Daño	Puntuación única	
	Parque eólico, 693 Turbinas	Central Térmica
	KPt	KPt
Salud Humana	136,25	21,1
Calidad Ecosistema	17,13	2,0
Cambio Climático	74,87	17,0
Recursos	69,75	9,9
TOTAL	298	50

Comparación en “fase de operación” de los tipos de generación eléctrica.

Se quiere ver la evaluación de impacto a las categorías de daño en la fase de operación de ambos tipos de generación eléctrica. Se compara los resultados del ACV, para puntuación única, en la fase de operación. Sabemos que para el parque eólico el impacto en esta fase es cero, mientras que para la central térmica los datos se muestran en la Tabla 17. En ella puede observarse como el mayor impacto es el daño al cambio climático y el daño a los recursos.

Tabla 17.- Comparación de los resultados del ACV de las dos generaciones eléctricas, puntuación única, en fase de operación

Categoría de Daño	Puntuación única	
	Parque eólico, 693 Turbinas	Central Térmica
	KPt	KPt
Salud Humana	0	7560
Calidad Ecosistema	0	1080
Cambio Climático	0	10900
Recursos	0	8190
TOTAL	0	27.730

Comparación de la central térmica con y sin captura de CO₂

Con esta comparación se quiere ver los impactos a las categorías de daño que pueden afectar con la implementación de una planta de captura de CO₂. Se comparan los resultados del ACV, para la puntuación única para la central térmica con captura y sin captura. En la Tabla 18 se puede observar que los impactos a las categorías de daño de la central térmica con planta de captura de CO₂ con respecto a la central térmica sin captura, son significativos. Si nos fijamos en el daño al cambio climático, se puede apreciar claramente el efecto de la planta de captura disminuyendo su impacto (2,08 Pt/GWh) con respecto a la central térmica sin captura (157 Pt/GWh). También es importante la disminución del impacto al daño a la salud humana, al daño a los recursos y al daño a la calidad del ecosistema.

Tabla 18.- Comparación de los resultados del ACV para la central térmica con y sin captura de CO₂, puntuación única y vida útil

Categoría de Daño	Puntuación única	
	CT + CC	CT
	Pt/GWh, vida útil	Pt/GWh, vida útil
Salud Humana	1,91	109,00
Calidad Ecosistema	0,19	15,60
Cambio Climático	2,08	157,00
Recursos	37,10	118,00
TOTAL	41,3	400

CT: Central térmica. CC: Captura de CO₂

6.-CONCLUSIONES

Se ha realizado el ACV de una central térmica con una planta de captura de CO₂ y el ACV de una turbina de viento. Para ello, se ha utilizado el software SimaPro 8.02 y se ha aplicado la metodología del IMPACT 2002+, que nos permite obtener los impactos a las categorías de daño (salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos), de los dos tipos de generación eléctrica una convencional con captura de CO₂ y otra renovable, con el objeto de comparar los impactos que producen a las cuatro categorías de daño a lo largo del ciclo de vida de ambas tecnologías.

Los siguientes puntos resumen las conclusiones principales de este trabajo:

- Este estudio compara por primera vez, los impactos medioambientales calculados a partir del ACV, entre una central térmica de carbón con y sin captura de CO₂, con una planta de generación a partir de energía renovable, como es un parque eólico.
- La utilización de la metodología IMPACT 2002+ se ha utilizado por primera vez para calcular estos impactos tanto en la planta térmica con captura, como en el parque eólico.
- Todos los impactos a las cuatro categorías de daño son similares o mayores, especialmente en el daño a los recursos naturales, para la central térmica con captura que para la generación eléctrica eólica (renovable) que es un orden de magnitud mayor. Es significativo que el daño a la salud humana y a los ecosistemas es mayor en el caso de la generación eólica, debido a los materiales de construcción de los aerogeneradores. No obstante el daño a los recursos naturales es mucho mayor en la central térmica con captura debido al gran consumo de carbón (recurso no renovable) a lo largo de la vida útil de la central.
- Cuando se comparan los resultados del ACV, para la puntuación única, de los dos tipos de generación eléctrica objeto de estudio, en la “Fase de Construcción”, se observa que los impactos a las cuatro categorías de daño son mayores en la generación eólica que en la central térmica convencional. El elevado número de turbinas, es concluyente.
- Esta comparación incluye los impactos nulos de la operación de las turbinas eólicas, frente al significativo impacto de la operación en la central térmica, debido al consumo constante de combustible fósil.
- Comparando los resultados del ACV, para la puntuación única, de la central térmica con captura de CO₂ y los mostrados por la central térmica sin captura de CO₂, muestran claramente que la planta de captura ejerce una elevada disminución de los impactos a los daños al cambio climático, al daño a la salud humana, daño a los recursos y daño a la calidad del ecosistema. El impacto a la salud humana, a la calidad del ecosistema y al cambio climático al incluir la captura de CO₂ en una central térmica de carbón, se reducen un 98-99% de sus valores originales sin captura de CO₂.

REFERENCIAS

Banister D, Stead D, Steen P, Åkerman J, Dreborg K, Nijkamp P, Schleicher-Tappeser R, 2000. European transport policy and sustainable mobility. Spon, Suffolk, p 255.

Bare JC, Hofstetter P, Pennington DW, Udo de Haes H, 2002. Life cycle impact assessment workshop summary - Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. *International Journal of Life Cycle Assessment* 5: 319-326.

Bolea I, 2006. Simulación del funcionamiento de una torre de absorción química e integración en una central térmica para la captura de CO₂ de los gases de combustión. PFC. Universidad de Zaragoza.

Comisión Europea, 2008. DIRECTIVA 2009/31/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono y captura CO₂.

Ecoinvent 3.1, 2014. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, (ETH Zurich). Zurich, Switzerland.

Fadeyi S, Arafat HA, Abu-Zahra M, 2013. Life cycle assessment of natural gas combined cycle integrated with CO₂ post-combustion capture using chemical solvent. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 19, 441–452.

Goedkoop MJ, Spriensma R (2000). Eco-indicator 99, a damage oriented method for lifecycle impact assessment, Methodology Report, second edition. Pré Consultants, Amersfoort (NL), Netherlands.

Guinée JB, Gorrée M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, de Koning A, van Oers L, Wegener Sleeswijk A, Suh S, Udo de Haes HA, de Bruijn H, van Duin R, Huijbregts MAJ, 2001. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. Ila: Guide. Iib: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Henkel J, 2006. Life Cycle Assessment of Carbon Dioxide Capture and Storage. Diploma Thesis, Institute for Energy and Environmental Research and Berlin University of Technology, Heidelberg.

Hertwich EG, et al., 2002. Introduction. In *Life Cycle Impact Assessment: Striving towards Best Practice*. Udo de Haes, H. A., Eds, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Penscola.

Hertwich EG et al. 2008. Life-cycle assessment of carbon dioxide capture for enhanced oil recovery. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 16 (3), 343–353.

van Horssen A, Koornneef J, 2010. In-depth study of environmental themes in CCS chains. D02-WP 4.3-CATO2 report, TNO, Ecofys. The Netherlands)

Huijbregts M, Hellweg S, Frischknecht R, Hendriks H, Hungerbühler K, Hendriks A, 2010. Cumulative energy demand as predictor for the environmental burden of commodity production. *Environ. Sci. Technol.* 44 (6), 2189–2196.

Humbert S, Schryver AD, Bengoa X, Margni M, Jolliet O, 2014. IMPACT 2002+, User Guide for Q2.21.

www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.21.pdf.

Idrissova F. 2004. Life Cycle Assessment of Selected Carbon Dioxide Capture, Transportation and Storage Options from Coal-fired Power Plants, Master thesis, Technische Universität Freiberg.

IEA. 2008. Energy Technology Perspectives - Scenarios and strategies to 2050. Paris: IEA, Organisation for Economic Cooperation and development.

IPCC, 2005. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Intergovernmental Panel on Climate Change, New York.

IPCC, 2007. Climate Change 2007. Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, New York.

ISO, 2006. ISO standards for life cycle assessment to promote sustainable development. <http://www.iso.org/iso/pressrelease.htm?refid=Ref1019>. Consultada 10 Abril 2015.

Jolliet O, Brent A, Goedkoop M, Itsubo N, Mueller-Wenk R, Peña C, Schenk R, Stewart M, Weidema B (2003a). LCIA Definition Study of the SETAC-UNEP Life Cycle Initiative. UNEP, [http:// www.unep.org/pc/sustain/lcinitiative/](http://www.unep.org/pc/sustain/lcinitiative/)

Jolliet O, Pennington D, Amman C, Pelichet T, Margni M, Crettaz P, (2003b): Comparative Assessment of the Toxic Impact of Metals on Humans within IMPACT 2002. In: Dubreuil A (Ed.): Life Cycle Assessment of Metals – Issues and Research Directions, SETAC Press.

Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G and Rosenbaum R (2003c). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment* 8 (6), 324-330.

Keller SP (2005). Assessing human Effect Factors for cancer in Life Cycle Impact Assessment (LCIA). Diploma thesis, ENAC – SSIE, EPFL, Lausanne, Switzerland.

Koornneef J, Ramírez A, van Harmelen T, van Horssen A, Turkenburg W, Faaij A, 2010. The impact of CO₂ capture in the power and heat sector on the emission of SO₂, NO_x, particulate matter, volatile organic compounds and NH₃ in the European Union. *Atmos. Environ.* 44 (11), 1369–1385.

Koornneef J, van Keulen T, Faaij A, Turkenburg W, 2008. Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2 (4), 448–467.

Korre A, Nie Z, Durucan S, 2010. Life cycle modelling of fossil fuel power generation with post-combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4 (2), 289–300.

Liu CH, Lin SJ, Lewis C, 2012. Environmental Impacts of Electricity Sector in Taiwan by Using Input-Output Life Cycle Assessment: The Role of Carbon Dioxide Emissions. *Aerosol and Air Quality Research*, 12: 733–744.

Lombardi L, 2003. Life cycle assessment comparison of technical solutions for CO₂ emissions reduction in power generation. *Energy Conversion and Management* 44 (1), 93–108.

Martínez E, Sanz F, Pellegrini S, Jiménez E, Blanco J, 2009. Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. *Int J Life Cycle Assess* 14:52–63.

Metz B, et al. 2005. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Inter-governmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland (Working Group III).

Metz B, 2005a. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press.

NETL, 2010. Life Cycle Analysis: Supercritical Pulverized Coal (SCPC) Power Plant. DOE/NETL-403/110609. Pittsburgh, PA, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.

NETL (2010b). Life Cycle Analysis: Existing Pulverized Coal (EXPC) Power Plant. DOE/NETL-403- 110809. Pittsburgh, PA, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.

Nie Z, Korre A, Durucan S. 2011. “Life cycle modeling and comparative assessment of the environmental impacts of oxy-fuel and post-combustion CO₂ capture, transport and injection process.” *Energy Procedia* 4:2510-2517.

Odeh NA, Cockerill TT, 2008. Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage. *Energy Policy* 36 (1), 367–380.

Pennington DW, Margni M, Ammann C, Joliet O, 2005. Multimedia Fate and Human Intake Modeling: Spatial versus Nonspatial Insights for Chemical Emissions in Western Europe. *Environ. Sci. Technol.*, 39 (4), 1119–1128.

Pehnt M, 2006. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renew Energ* 31(1):55–71.

Pehnt M, Henkel J, 2009. Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 3 (1), 49–66.

Pennington DW, Margni M, Payet J and Jolliet O, 2006. Risk and Regulatory Hazard Based Toxicological Effect Indicators in Life Cycle Assessment (LCA). *Human and Ecotoxicological Risk Assessment Journal* 12, 450-475.

Ramaswamy V, Boucher O, Haigh J, Hauglustaine D, Haywood J, Myhre G, Nakajima T, Shi GY, and Solomon S, 2001. Radiative Forcing of Climate Change Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, JT Houghton, Y Ding, DJ Griggs et al., eds., IPCC, New York.

Rao AB, Rubin E, 2002. A technical, economic, and environmental assessment of amine based CO₂ capture technology for power plant greenhouse gas control. *Environmental Science and Technology* 36 (20): 4467-4475.

SimaPro, LCA Software 2014. Pré Consultants, 2014, Netherlands. <http://www.pre-sustainability.com/simapro>).

Singh B, 2011. Environmental evaluation of carbon capture and storage technology and large scale deployment scenarios. Thesis for the degree of philosophiae doctor. Trondheim. NTU.

Singh, B., Strømman, A. H., Hertwich, E., 2010a. Life cycle assessment of natural gas combined cycle power plant with post-combustion carbon capture, transport and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control* doi:10.1016/j.ijggc.2010.03.006.

Singh, B., Strømman, A. H., Hertwich, E., 2010b. Comparative impact assessment of CCS portfolio: Life cycle perspective. Presented at International Conference on Greenhouse Gas Technologies 2010 (GHGT-10) 19-23 September 2010, Netherlands.

Spath P L, Mann MK, Kerr DR, 1999. Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production. NREL/TP-570-25119. National Renewable Energy Laboratory, NREL. U.S. Department of Energy Laboratory

Stangeland A, 2007. A model for the CO₂ capture potencial. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 1, 418–429.

Thambimuthu K, and Davidson J, 2004. Overview of CO₂ Capture. International Energy Agency.

Varun J, Bhat IK and Prakash R, 2009. LCA of renewable energy for electricity generation systems: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 13, 1067–1073.

Veltman K, Singh B, Hertwich D, 2010. Human and Environmental Impact Assessment of Postcombustion CO₂ Capture Focusing on Emissions from Amine-Based Scrubbing Solvents to Air. *Environmental Science Technologic*, 44, 1496–1502.

Viebahn P, Nitsch J, Fishedick M, Esken A, Schüwer D, Supersberger N, Zuberbühler u, Edenhofer O, 2007. Comparison of carbon capture and storage with renewable energy technologies regarding structural, economic, and ecological aspects in Germany. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 1 (1), 121–133.

ZEP, 2009. European Comission. Strategic Overview. European Technology Platform for Zero emission Fossil Fuel power plants.

ZEP, 2006. European Comission. A vision for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants Technology Platform.