

## **EVALUACIÓN DE UN AEROGENERADOR NACIONAL DE BAJA POTENCIA EMPLEANDO METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.**

A. Rivarola<sup>1,2</sup>, I. Madrazo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo CLIOPE “Energía, Ambiente y Desarrollo Sustentable” Facultad Regional Mendoza  
Universidad Tecnológica Nacional – Rodríguez 273 – Ciudad – Mendoza – C.P.5500

<sup>2</sup>Laboratorio de Energía Eólica Mendoza-INTI Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Tel. 0261-5243000 e-mail: [andream@frm.utn.edu.ar](mailto:andream@frm.utn.edu.ar)

*Recibido 13/08/16, aceptado 10/10/16*

**RESUMEN:** Actualmente se producen y comercializan en el país aerogeneradores de baja potencia que en general no cuentan con una evaluación de su impacto ambiental. En este trabajo se estudia el impacto ambiental de producir un aerogenerador de 1,3 kW mediante un análisis de ciclo de vida (ACV). Se procedió a realizar un inventario de todos los materiales y procesos consumidos en la fabricación, para desarrollar su ciclo de vida y analizarlo posteriormente. Como conclusiones se puede resaltar que los materiales y/o procesos de fabricación asociados a la fabricación de la torre y el generador son los que más contribuyen al impacto total calculado, que principalmente producirá daños potenciales sobre la salud humana, en menor medida sobre los recursos naturales y por último en la calidad de los ecosistemas, de acuerdo al método de análisis seleccionado.

**Palabras clave:** aerogeneradores de baja potencia, impacto ambiental en fabricación, ACV.

### **INTRODUCCIÓN**

La energía eólica se está desarrollando a nivel nacional y global a un ritmo cada vez más rápido. Si bien es una energía renovable, tiene un impacto ambiental asociado que debe conocerse y minimizarse de ser posible. Actualmente, estos efectos no se tienen en cuenta en la industria nacional. Tampoco está estudiado internacionalmente de forma tan exhaustiva como en la generación de alta potencia, por lo que la información y bibliografía disponible es escasa.

La producción de energía eólica de forma distribuida es una forma para satisfacer la creciente demanda energética poco desarrollada en Argentina hasta el momento. Las barreras claves que evitan su desarrollo generalizado son la falta de un marco regulatorio adecuado, falta de demanda y de financiación, subsidios federales a la electricidad, consideraciones macroeconómicas, costos altos de manufactura y la competencia de productos o alternativas importadas (Fidel, 2012). A escala doméstica, el aprovechamiento del recurso eólico brinda una alternativa a la red de distribución, que actualmente no alcanza a toda la población y puede ser poco confiable como lo demuestran los numerosos cortes de luz en ciertas zonas del país. El autoabastecimiento permite, a nivel nacional, una reducción de la importación de energía y por lo tanto la desvinculación parcial de su precio en el mercado global.

#### *Objetivo del estudio.*

Estimar el impacto ambiental de un aerogenerador de baja potencia, de fabricación nacional.

Identificar a través de los resultados los materiales o procesos de mayor impacto ambiental y así evaluar otras alternativas a emplear.

## METODOLOGÍA

El análisis de ciclo de vida es una metodología que permite cuantificar el impacto ambiental de un determinado producto. Puede realizarse por etapa del ciclo de vida, por partes en un equipo o en forma total. Estos estudios permiten entre otras cosas afirmar con una base teórica la sustentabilidad de los aerogeneradores, detectar las etapas problemáticas y las posibilidades de mejora en la elección de materiales y procesos.

Se utiliza para el estudio el software SimaPro, el cual permite analizar el impacto ambiental de una serie de materiales y procesos ingresados según distintos métodos. Estos métodos se desarrollan siguiendo diferentes metodologías y para determinadas zonas. Todos los procesos y materiales necesarios para la producción del equipo se contabilizan en el inventario de ciclo de vida. Esta información se carga en el programa eligiendo dentro de las opciones que contenga la base de datos, que incluye todos los impactos asociados a un determinado proceso desde la extracción de materia prima. La base de datos que utiliza el software se desarrolló para Europa y Estados Unidos, por lo cual los resultados obtenidos se evalúan cualitativamente y son útiles como una estimación y puntos de partida para distintos análisis. Si bien esto es una limitación, no hay una alternativa local aún que nos dé una estimación del daño de la producción específicamente en Argentina ni Latinoamérica.

El equipo que se analiza fue fabricado en Río Cuarto, provincia de Córdoba. Está instalado en La Jaula, una localidad de la provincia de Mendoza cercana a San Rafael, en una escuela rural aislada de la red eléctrica. Tiene las siguientes características técnicas:

MODELO	48V 1300W
Tensión Nominal	48V
Potencia Nominal/Vel. del viento	1300W a 14 m/s
Generador	Síncrono de Imán Permanente
Imanes	Neodimio
Rectificación	Puente de diodos trifásico externo (en la base)
Almacenaje de Corriente	Batería
Configuración del Rotor	Eje Horizontal a Barlovento
Revoluciones del Rotor	Variable
Cantidad de Palas	3
Diámetro del Rotor	2,1 m.
Área de Barrido	3,46 m <sup>2</sup>
Perfil de la Pala	NACA 4412
Angulo de la pala	6°
Material de la Pala	Polímero de Ingeniería con aditivo UV
Peso de la Pala	836 g. cada una
Vida útil de la Pala	10 años
Soporte de Cola	Caño de hierro
r.p.m. a Potencia Nominal	800
r.p.m. a Velocidad de salida	1200
Velocidad de viento de corte	25 m/s
Velocidad de viento de inicio	3 m/s
Temperatura de Trabajo	-40 a 65°
Características del cuerpo	Hermético de Aleación de Aluminio
Características del Eje	Montado sobre rodamientos blindados y crapodina
Orientación	Con veleta orientadora
Freno	Dinámico y Mecánico
Vida útil del generador	30 años

Tabla 1: Especificaciones del aerogenerador estudiado.

*Definiciones del sistema*

La unidad funcional representa la medida a la cual están referidos los resultados del análisis, en este caso es 1 kWh de electricidad entregado por el aerogenerador.

#### *Limitaciones*

- No se consideró ningún tipo de conexión eléctrica.
- No se consideraron componentes que representaran un porcentaje pequeño en comparación con el peso del equipo.
- Los límites del sistema abarcan el aerogenerador y la torre que lo sostiene, dejando afuera todo cableado y sistema de almacenamiento.
- La etapa de fabricación considerada abarca desde la entrada de las materias primas a la fábrica hasta la instalación del equipo en su ubicación definitiva.

#### *Inventario de materiales y procesos*

A continuación se describen las partes principales del equipo, que fueron consideradas en este trabajo:

**Rotor:** Se encarga de transformar la energía cinética del viento en un momento torsor que se comunica al eje del generador. Cuenta con tres palas que se fabrican por medio de inyectora. Al no tener especificaciones del polímero usado se asumió una mezcla de fibra de vidrio y poliamida utilizada para el proceso estándar de inyección. El rotor tiene además una masa y estrella de aluminio.

**Torre:** La torre sobre la que se monta el aerogenerador es del tipo reticulada, tiene una sección triangular producida en tramos de 6m, construida con hierro galvanizado. Se sostiene por riendas de cable de acero, ensamble a buje, torniquetes, grilletas y burlonería. Tiene una altura total de 30 metros. Se realizó un cálculo del volumen de hierro necesario para la estructura, empleando las cantidades de material utilizado y además se asumió una disposición geométrica basada en normas y modelos empleados a nivel nacional. Se obtuvo su peso usando la densidad más alta del intervalo en que ésta puede variar para hierro de tipo fundición gris, de 6,95 a 7,35 g/cm<sup>3</sup>. De varios ofertantes nacionales de torres para antenas se obtuvo que el proceso de galvanizado se realiza en caliente por inmersión, según las normas vigentes. Para una torre de 30m se utilizan 460m de cable de 7 hilos y 3mm de diámetro que pesa 0,0450 kg/m. Este dato se estimó como el promedio de los datos recopilados de distintos catálogos. De una metalúrgica local se obtuvo que para una torre de sección cuadrada de 30 m de altura las soldaduras se realizan con equipo semiautomático y se estima que demandan 8 horas por día durante 3 días. Los equipos para soldar semiautomáticos pueden ser de tipo TIG, MIG o MAG. Sus potencias suelen variar entre 180, 220, 350 y 400 amperes. Se toma 220 como un valor medio representativo. Debido a que el programa requería una longitud para ingresar el proceso se estimó por puntos de soldadura asumiendo 2 cm de longitud en cada uno y calculando su cantidad a partir del esquema de torre que se utilizó antes.

**Generador:** Convierte la energía mecánica en electricidad. Es un equipo síncrono trifásico de imán permanente de 8 polos con imanes de neodimio, con un peso total de 25 kilos. La cantidad de neodimio necesaria se calculó a partir de datos para equipos de alta potencia de la Universidad Técnica de Dinamarca como 250 kg de Nd por cada MW producido. Los elementos restantes del imán se calcularon por porcentajes en peso a partir de este dato. Los imanes permanentes se fabrican por sinterizado (pulvimetalurgia) o por ligado (solidificado rápido). Ninguno de estos procesos se encontró en la base de datos por lo que se consideró dentro del trabajo con metales genérico. Para los datos faltantes se utilizaron los datos de un equipo similar producido por INVAP (el IVS-4500 de 4,5kW), considerando las diferencias por proporcionalidad en peso total y potencia. Se incluyeron así 9 kg para la carcasa de aluminio 6063 y 2.62 kg de hilo de cobre para el bobinado del estator. El estator y rotor son laminados de acero al silicio y su peso se calculó de forma estimativa restando al peso total las partes ya mencionadas y 1 kg que se supuso representativo para los rodamientos de acero.

Sistemas de freno y orientación: No se tomarán en cuenta en este trabajo. Consisten principalmente en una veleta que orienta el equipo hacia el viento y un freno mecánico.

Transporte: Se va a considerar el flete del equipo de 40 kg en camión pequeño desde Río Cuarto y de la torre desde San Rafael para instalación. Por rutas nacionales hay 486 km entre Río Cuarto y San Rafael, y se estimó la distancia lineal desde ahí a La Jaula en 90 km. Se considerarán para el equipo 4 mantenimientos por año, realizados por los usuarios de la escuela ya que se considera poco probable que los técnicos se trasladen hasta la localidad. Si bien se consideró la etapa de transporte como un factor aparte a considerar en el proceso, debe tenerse en cuenta que hay transportes contabilizados también dentro del impacto de cada material en la base de datos utilizada.

Los resultados del inventario se resumen en la Tabla 2, indicando la fuente principal de la información como referencia.

Parte	Material	Peso (kg)	Referencias
Rotor	Aluminio	2,16	Fabricante
Palas	Polímero de ingeniería inyectado	2,94	Fabricante, polímero supuesto
Torre	Hierro galvanizado	160,6	Calculado
	Acero galvanizado	20,7	Fabricante
	Hormigón con estructura de acero	10	Supuesto
Generador	Acero al silicio	11,29	Calculado
	Acero	1	Supuesto
	Cobre	2,62	Calculado
	Aluminio	9	Calculado
	Óxido de Neodimio	0,379	Calculado
	Óxido de boro	1,143	Calculado
	Mineral de hierro	0,042	Calculado
	Mineral de Aluminio	0,00325	Calculado

Tabla 2: Inventario de materiales por parte del equipo.

#### Métodos Empleados

a -Eco indicator 99: Este método se enfoca en las consecuencias finales utilizando indicadores “de puntos finales”, desarrolla modelos de daño para agrupar los distintos impactos en tres categorías de daño generales (Goedkoop y Spriensma,2001), como se muestra en la Figura 2. Estas categorías son:

- Daño a la salud humana, se expresa el número de años de vida perdidos y los vividos con discapacidad combinados en un índice usado también por la Organización Mundial de la Salud (WHO).

- Daño a la calidad de ecosistemas, se expresa como la pérdida de especies en una determinada área para cierto tiempo.
- Daño a los recursos, se expresa como el exceso de energía necesario para extracciones futuras de minerales y combustibles fósiles.

Cada categoría de daño incluye los siguientes impactos ambientales:

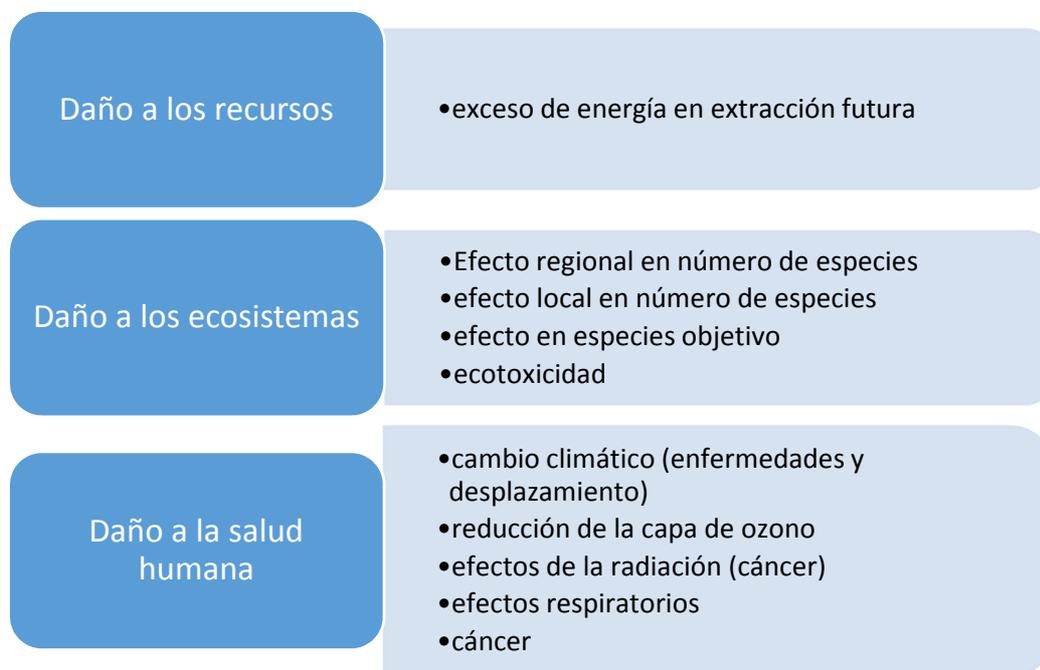


Figura 2: Impactos considerados en cada categoría de Eco indicador 99

b- CML: Este método se enfoca en las categorías de impacto específicas, sus indicadores son “de puntos medios”. Surge de una guía operacional para las normas ISO, realizado por la universidad de Leiden, Centro de Ciencia Ambiental (CML). Algunos indicadores pueden calcularse para distintos periodos de tiempo, los mostrados en el Figura N°5 se tomaron a tiempos infinitos.

Para ambos métodos la validez es global para la mayoría de las categorías de impacto, y restringida a Europa para algunos de los impactos menos importantes.

## RESULTADOS

### *Evaluación del impacto por distintos métodos*

Los resultados que se muestran a continuación corresponden al Método de Eco Indicador 99 y al CML. Se presentan de forma ilustrativa los gráficos que da como resultado el programa, seguidos de su descripción y análisis.

En la Fig. N°3 se observa el impacto total asociado a la etapa de fabricación y transporte del aerogenerador en estudio. En este caso se pueden diferenciar las diferentes categorías de impactos consideradas de acuerdo al método del Eco-Indicador 99. Cada barra del gráfico presenta una categoría de impacto, en el siguiente orden comenzando por arriba: Acidificación, Minerales, Cambio Climático, Ecotoxicidad, Combustibles Fósiles, Respirables Inorgánicos y Carcinogénicos.

Este gráfico sugiere que las mayores contribuciones al impacto total están dadas por los carcinógenos, respirables inorgánicos, combustibles fósiles y eco toxicidad. En tanto en la Fig. 4 se observan las categorías por daño “categorías finales o end-point” vinculadas a las diferentes partes del equipo. Del análisis de la figura se desprende que el mayor impacto está dado en la categoría salud de las personas y la mayor contribución está asociada a la fabricación de la torre y generador.

En la Figura N°4 se ve el resultado que brinda el programa para el mismo método, pero agrupado por categorías de daño o consecuencias finales. Cada columna representa una categoría y se representan en el siguiente orden empezando por la izquierda: Salud Humana, Calidad de Ecosistemas y Recursos. Cada barra de las columnas corresponde a una parte del equipo. Esto nos permite analizar donde se produce el mayor daño final y la contribución relativa de cada parte del equipo a este daño.

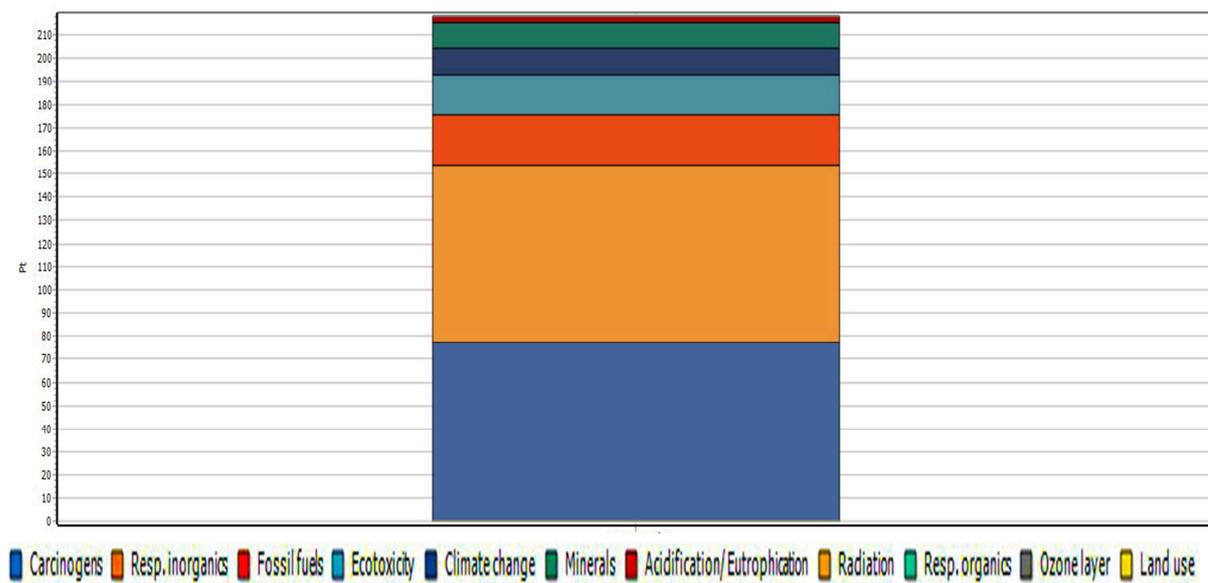


Figura 3: Impactos ambientales por categoría en toda la fabricación según Eco indicador 99.

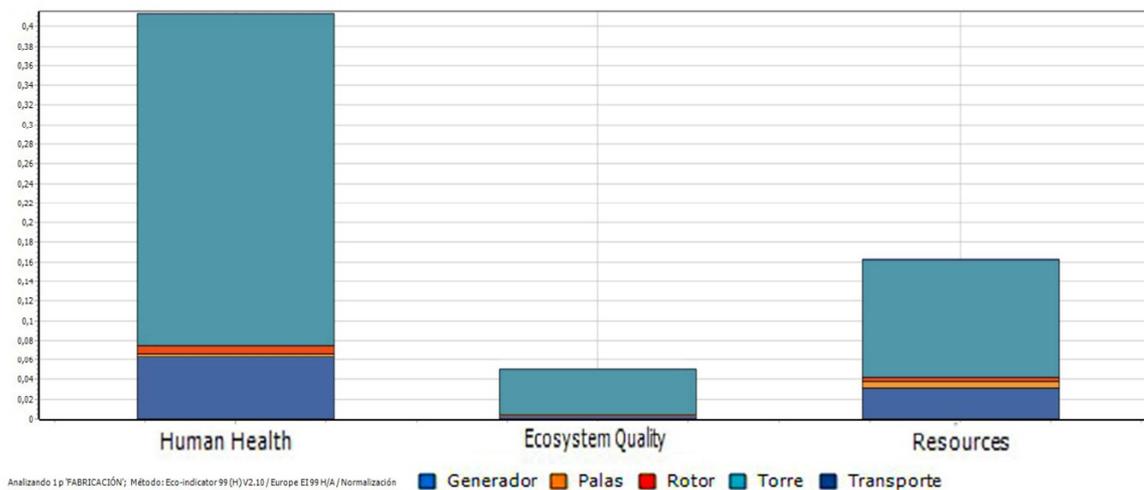


Figura 4: Categorías de daño final causadas por cada parte del equipo con eco indicador 99.

En tanto en la Fig. 5, se muestran los resultados correspondientes a la aplicación del método CML, donde las categorías de impacto evaluadas no coinciden con las empleadas por el método del Eco Indicador 99. Además las categorías de impactos están más vinculadas con los contaminantes por lo que hablaremos de “indicadores de tipo mid-point”. En este caso los resultados sugieren que la fabricación de la torre y el transporte son las etapas de mayor impacto. Se ve en el gráfico una barra por cada una de las siguientes categorías de impacto, de izquierda a derecha: toxicidad humana, ecotoxicidad acuática en agua dulce, ecotoxicidad acuática en agua marina, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad de sedimentos de agua dulce.

Estos impactos pueden resultar ilógicos, pero debe tenerse en cuenta que lo que se está estudiando es el ciclo de vida completo de la fabricación del equipo y los impactos ambientales que de él surgen incluyen aquellos asociados a extracción de materias primas, transporte, desechos de procesos, etc.

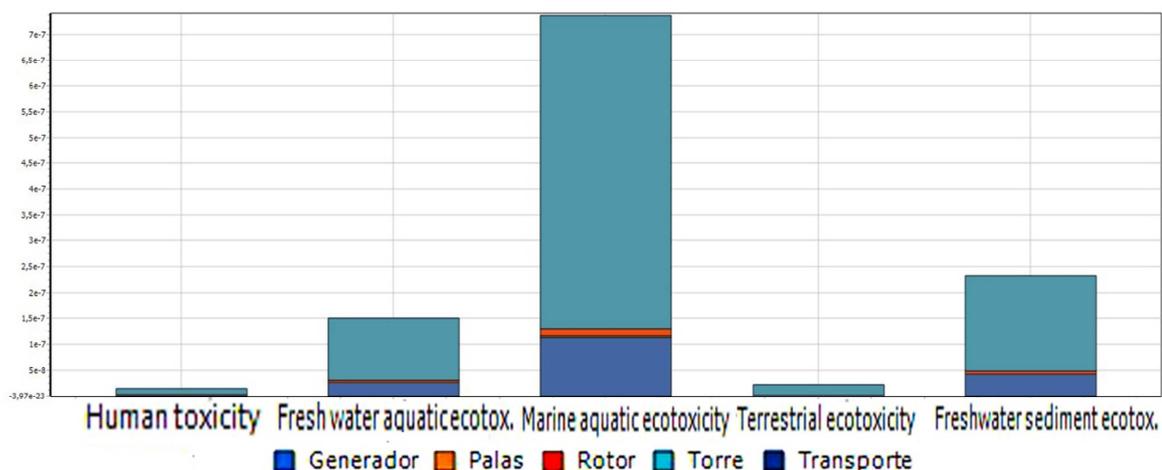


Figura 5: Categorías de impacto por parte del equipo con CML.

## CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.

Se concluye lo siguiente:

- Las partes que más impacto producen son el generador y la torre por cualquiera de los métodos.
- Se identifica en orden decreciente un daño potencial sobre la salud humana, en menor medida sobre los recursos y por último en la calidad de ecosistemas de acuerdo al Método del Eco-Indicador 99.
- Según el Método del Eco-Indicador 99, el mayor impacto ambiental se presenta en las siguientes categorías de impacto: carcinogénicos, los respirables inorgánicos y los combustibles fósiles.
- Según el método CML, la fabricación y materiales de la torre son los que tendrán mayor impacto en la contribución total de impactos.
- En la torre, el mayor impacto lo tiene el proceso de soldadura, que se refleja principalmente en la categoría de carcinogénicos. Le sigue en contribución la producción de hierro, que predomina en la categoría de impacto por respirables inorgánicos.
- En el generador, el material que mayor impacto tiene es el aluminio aleado que afecta principalmente las categorías de respirables inorgánicos y combustibles fósiles. Le sigue el cobre que impacta en forma de carcinogénicos.

Los resultados de este trabajo preliminar podrán ser empleados como base para nuevos estudios de aerogeneradores de baja potencia de fabricación nacional. Se ha observado una ausencia de este tipo de trabajos en la actualidad, cabe remarcar que un ACV brinda el perfil ambiental de un producto como es un aerogenerador, pero también genera información valiosa para fabricantes. Es interesante resaltar cómo al focalizarnos en equipos de potencias menores, el impacto asociado a las torres y generadores cobra mayor peso que para equipos de potencias mayores. En los numerosos ACV realizados a equipos de alta potencia se puede ver que el mayor impacto está en las palas y se enfatizan por lo tanto sus opciones de reciclado (Martínez Cámara et al., 2010). La investigación y estudio de equipos de diferentes potencias y fabricantes generará información valiosa para el fabricante y la industria involucrada. Pero sobre todo permitirá el armado de una base de datos tanto de materiales como de procesos de fabricación para aerogeneradores

nacionales de baja potencia, lo que permitirá realizar ACV con información regional y garantizará que los resultados sean cada vez más reales. En este trabajo se hizo hincapié en la búsqueda de datos de materiales y procesos asociados al equipo estudiado, en un siguiente estudio se buscará avanzar en la parte metodológica.

## REFERENCIAS

Figel, T. (2012). Small and Distributed Wind Energy in Argentina, Barriers and Development Strategies. Thesis for the fulfilment of the Master of Science in Environmental Sciences, Policy & Management.

Pré, varios autores (2014). SimaPro Database Manual, Methods Library.

Goedkoop, M. y Spriensma, R. (2001) Eco Indicator 99 methodology report

Martínez Cámara, E.; Jiménez Macías, E.; Blanco Fernández, J.; Pérez de la Parte, M. (2010) Environmental Impact of Modern Wind Power under LCA Methodology Universidad de La Rioja, España. Wind Power, S M Muyeen.

## ABSTRACT

Currently, small wind turbines which don't generally have an evaluation of their environmental impact are produced and commercialized in Argentina. In this paper, the impact of producing an 1,3 kW wind turbine is studied using a life cycle analysis (LCA). An inventory of all the materials and processes consumed in the manufacturing stage was carried out, followed by the development and analysis of its life cycle. As conclusions, it can be pointed out that the greater contribution to the impact lies in the tower and the generator. This impact damages mostly human health, then natural resources and least of all ecosystem quality.

**Keywords:** small wind turbines, environmental impact in manufacturing, LCA.