



## ESTUDIO Y COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE FIN DE VIDA APLICADAS A PALAS DE AEROGENERADORES, EMPLEANDO METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.

A. Rivarola<sup>1</sup>, L. Torres<sup>2</sup>, A. M. Rivarola<sup>3</sup>, G. Berrios<sup>4</sup>, M. C. Gardey<sup>5</sup>, P. Gatica<sup>6</sup>, P. Arena<sup>7</sup>.  
Grupo CLIOPE “Energía, Ambiente y Desarrollo Sustentable” Facultad Regional Mendoza  
Universidad Tecnológica Nacional – Rodríguez 273 – Ciudad – Mendoza – C.P.5500  
Tel. 0261-5243000 e-mail: [andreari@frm.utn.edu.ar](mailto:andreari@frm.utn.edu.ar)

**RESUMEN:** En la actualidad, la industria eólica ha avanzado en la investigación y el empleo de nuevos materiales en la fabricación de aerogeneradores, aunque no han evaluado igualmente como serán tratados los mismos al finalizar su vida útil. En este trabajo se presenta el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las palas de un aerogenerador, mediante siete alternativas de disposición fin: dos de Incineración, una de Relleno, dos de Reciclado Químico: Pirolisis y Lecho Fluidizado respectivamente, una de Reciclado Mecánico y una de Reúso). De las conclusiones se destaca la identificación de los procesos con menor impacto ambiental como alternativa de fin de vida. Estos son: reciclado químico a través de un Lecho Fluidizado, el Reciclado Mecánico y el Reúso. Finalmente, la alternativa de Reúso es planteada a través de un caso concreto que indica cómo se pueden reutilizar las palas reduciendo al mínimo el consumo de energía, el empleo de materiales adicionales y la generación de desechos.

**Palabras clave:** palas de aerogeneradores, etapas de fin de vida, ACV (Análisis de Ciclo de Vida).

### INTRODUCCIÓN

La industria eólica mundial ha experimentado un crecimiento, tanto en términos de potencia instalada, como en relación al tamaño de los equipos. En la actualidad, las turbinas modernas son 100 veces más grandes que las de 1980 (Recycling wind, 2009). En el mismo periodo, los diámetros del rotor se han incrementado ocho veces, con palas de turbina que superan los 60 m de longitud. Las típicas palas de un aerogenerador, han sido fabricadas de fibras reforzadas, como por ejemplo: fibra de vidrio o fibra de carbono; de polímeros plásticos como poliéster o epoxi; de un material sandwich de base, como es el cloruro de polivinilo (PVC), PET o madera balsa y adhesivos para realizar las uniones, recubrimientos (poliuretánicos) y pararrayos.

Por otro lado, aunque se estima que la vida útil de un aerogenerador es aproximadamente de 20 años, es frecuente que se realice el reemplazo, en promedio, de una de las palas a lo largo de este tiempo, por lo cual aumenta el número de palas a reciclar por equipo. Así para el año 2034, se predice que habrán alrededor de 225.000 toneladas de material de palas que necesitarán ser recicladas anualmente a nivel mundial (Recycling wind, 2009). De acuerdo a los expertos, el problema surge, debido a que la industria eólica es aún muy joven. Esto significa, por ejemplo: una limitada experiencia práctica en relación al reciclado de turbinas, especialmente para las del tipo offshore y el hecho que ganar experiencia práctica en el desmantelamiento, separación y reciclado y disposición de los sistemas eólico es un proceso que tomará tiempo. Sin embargo es preciso comenzar a evaluar las diferentes alternativas de reciclaje para palas a través de análisis serios que permitan tomar adecuadas decisiones en la práctica.

En este trabajo se presenta el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (ISO 14040, 1997); (ISO 14041, 1998); (ISO 14042, 2000); (ISO 14043, 2000); (Guinée, 2002); (Sinden, 2010) de las palas de un aerogenerador. El ACV se enfoca principalmente en el análisis de disposición final de las palas, lo cual es tratado en forma genérica en la mayoría de los trabajos en que se emplea esta metodología. En la actualidad, existen aerogeneradores que no están en funcionamiento, o partes de los mismos que han finalizado su vida útil, sin embargo no existe aun disposición legal en Argentina que indique como trabajar con este tipo de residuos. En este aspecto, sería conveniente avanzar primero en la investigación de alternativas de fin de vida y sus posibilidades de implementación, para luego enfocarse en la construcción de una legislación que acompañe la implementación de las mismas.

### METODOLOGIA

El ACV permite describir y evaluar los impactos ambientales totales de un aerogenerador o de cualquiera de sus partes, analizando todas las etapas del proceso desde la provisión de materia prima, producción, transporte y generación de energía, hasta el reciclado y las etapas de eliminación de desechos. Por lo tanto, el ACV provee un análisis exhaustivo de los aspectos ambientales del aerogenerador y un panorama más exacto de las compensaciones ambientales verdaderas en la selección del mismo (Rivarola et al., 2007); (Rivarola et al., 2009); (Berrios et al., 2009). Esta metodología permite no sólo cuantificar dichas cantidades, sino también construir un perfil ambiental del producto analizado, consistente en una cuantificación del impacto producido en distintas categorías ambientales, tales como el calentamiento global, la eutrofización

1 y 5 Becario de Doctorado

2 y 3 Becario Graduado de Investigación

4 y 6 Becario Alumno de Investigación

5 Director de Grupo de Investigación

de las aguas y el adelgazamiento de la capa de ozono. Con el objeto de facilitar el entendimiento de este trabajo, se presenta a continuación un breve resumen del ACV realizado, que servirá como base para el desarrollo del resto del trabajo. Se realizó el ACV de las palas de una turbina eólica marca GAMESA G80, de 39 m de longitud de pala y de 6600 kg de peso sin considerar el scrap (restos de materias primas generados durante la fabricación), por pala. Se analizaron las diferentes etapas del ciclo de vida, tomando en consideración la extracción y transporte de las materias primas, la fabricación de la pala, el transporte de la misma al parque eólico, la instalación o montaje, el mantenimiento y el desmantelamiento final, donde se evaluaron diferentes escenarios de disposición final.

A continuación se presentan los materiales de la pala analizada y sus respectivas cantidades:

Material empleados por pala	Cantidad (kg)
Fibra de Vidrio	5750
Resina Epoxy	2090
Espuma de PVC	223
Aluminio	43,4
Acero Baja Aleación	7,8
Hierro	43,1
Cobre	2,2
Caucho Sintético	1,02
Nylon 66	0,6
Pintura	20

Tabla 1: Materiales y pesos correspondientes a la fabricación de 1 pala, considerando scrap.

Se establecieron diferentes criterios de corte, con el objeto de desarrollar el estudio en la práctica. A continuación se presentan los mismos:

- el aerogenerador tendrá una vida útil de 20 años, a lo largo de la cual se ha considerado el cambio de una de sus palas.
- la distancia correspondiente al transporte de la materia prima al lugar de fabricación de la pala será de 100 Km, la distancia del transporte de la pala hacia el lugar de montaje será de 300 Km y la distancia de transporte de la pala hacia el lugar de disposición final será de 200 Km.
- Todos los datos de electricidad y transporte fueron tomados de la base de datos del software SimaPro 7.

A continuación la Figura 1 presenta una gráfica a modo de resumen con las alternativas de fin de vida analizadas. Cada alternativa ha sido evaluada como un escenario de disposición final.

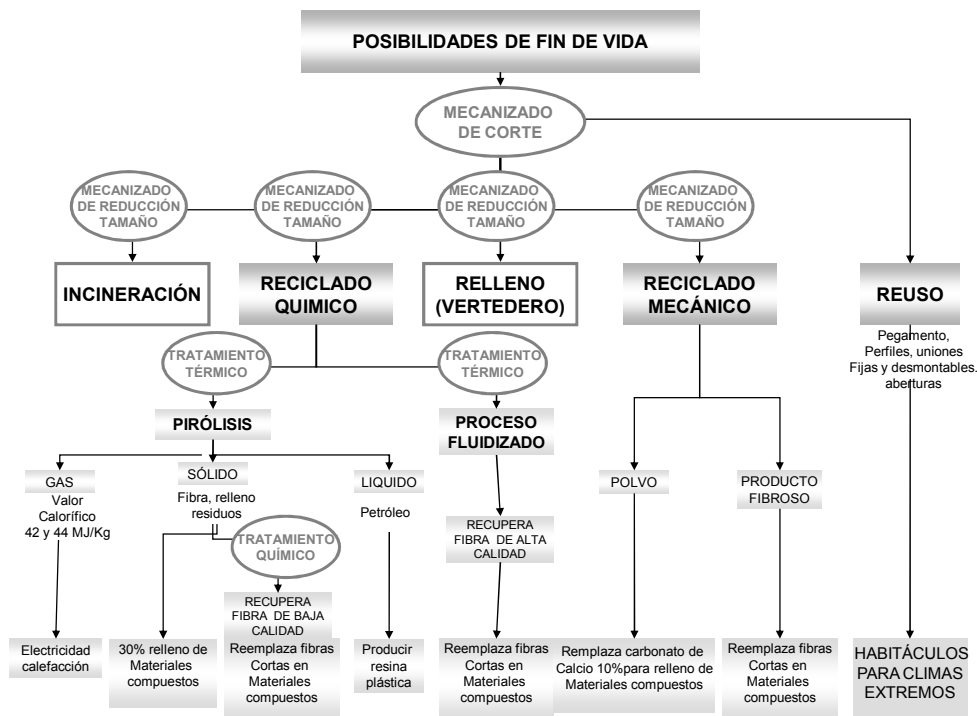


Figura 1: Alternativas de fin de vida para las palas de un aerogenerador

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Escenario 1

#### A) Reciclado Térmico "Incineración"

En este escenario se consideró la incineración del material de la pala. Se ha considerado que se incinerará el 100 % de la pala (Batumba Nalukowe et al, 2006). En esta operación se descompone el material de las palas empleando calor con o sin recuperación de energía a partir de los gases de combustión. Se traslada la pala, en un camión de carga pesada, hasta la planta de tratamiento ubicada a 200 km. En la planta se realiza el 1° Mecanizado de Corte, utilizando una Cizalla Hidráulica. A partir de este 1° corte se obtienen grandes porciones de material, que pasan a un 2° Mecanizado, que se realizará en un Molino de Martillo Hidráulico. Finalmente, se aplica el proceso de Incineración en un Horno de Doble Cámara, donde se obtienen como subproductos cenizas y gases.

Por otro lado, la incineración presenta desventajas como son: la emisión de contaminantes, los altos costos económicos laborales y de planta, etc. Además, el 60% del producto incinerado permanece en estado de cenizas que pueden ser contaminantes debido a la presencia de compuestos inorgánicos. Estos residuos pueden ser trasladados en un camión hasta una planta de tratamiento o hacia un vertedero. Como principal ventaja se puede mencionar, en el caso de recuperación de calor, que el mismo puede usarse para generar electricidad y alimentar sistemas de calefacción.

En este escenario, el consumo de combustible empleado en los procesos, fue tomado de la base de datos EPS 2000. Además, la operación de incineración que se presenta en este caso, no tiene en cuenta la recuperación de calor ni el tratamiento de los residuos generados.

### Escenario 2. Incineración

#### B) Reciclado Térmico "Incineración"

En este caso, también se realiza la incineración del 100 % de la pala, como en el caso anterior. Sin embargo, los datos empleados para el análisis han sido tomados de la base de datos Ecoinvent. En este caso se tiene en cuenta la recuperación de calor pero no el tratamiento de los residuos generados en el proceso.

### Resultados Escenarios 1 y 2

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos en los Escenarios analizados. En los gráficos propuestos en este trabajo se ha empleado como unidad de medida en el eje y, el sistema de Ecopuntos o Puntos (Pt) que son herramientas cuantitativas de representación de los impactos producidos (IHOBE, 1999). En ambos casos se empleó el mismo método de análisis Eco-Indicador 99, sin embargo las bases de datos empleadas son diferentes, debido a lo cual se ha considerado en forma diferente la operación de incineración. En el Escenario 2, se puede observar que la incineración con recuperación de calor dará una disminución significativa del impacto total, la cual influye, especialmente en las categorías de impacto: cambio climático y carcinógenos.

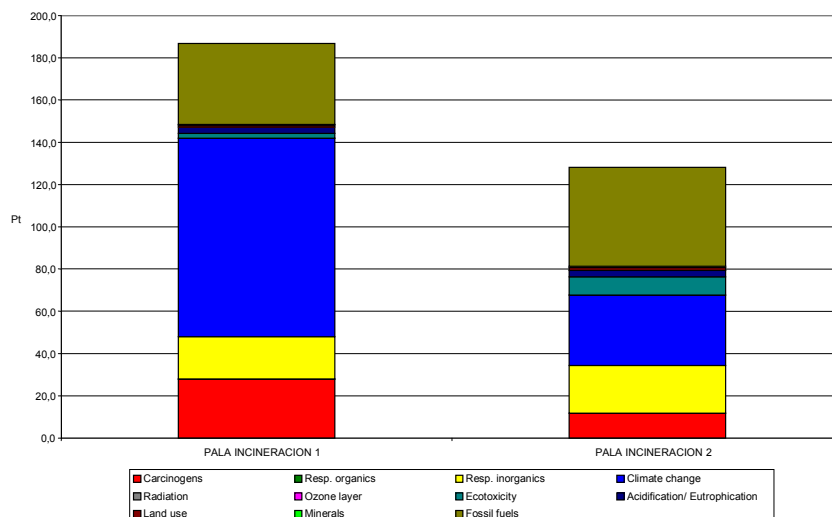


Figura 2: Comparación de resultados Escenarios 1 vs 2

### Escenario 3. Relleno

En este escenario se ha considerado el corte de la pala en partes más pequeñas, empleando un mecanizado de corte 1° y 2°, como el descrito en la incineración, luego se trasladan las partes hasta el relleno sanitario. Existen otras opciones de relleno, que no han sido consideradas en este análisis, como son: por un lado el transporte de la pala entera hasta el relleno o bien, la compactación de la pala, reduciendo el volumen de la misma para luego disponerla en relleno.

### Resultados Escenarios 3 vs comparaciones escenarios anteriores

Se puede observar el impacto total debido a la operación de Relleno, donde los combustibles fósiles son los que tendrán mayor contribución al impacto total. Además si se compara con los Escenarios anteriores, se puede ver como justamente la categoría de combustibles fósiles aumenta su impacto en este escenario en comparación con la incineración donde es significativamente menor. En la actualidad, la operación de relleno es una de las alternativas más empleadas para la disposición final de las palas.

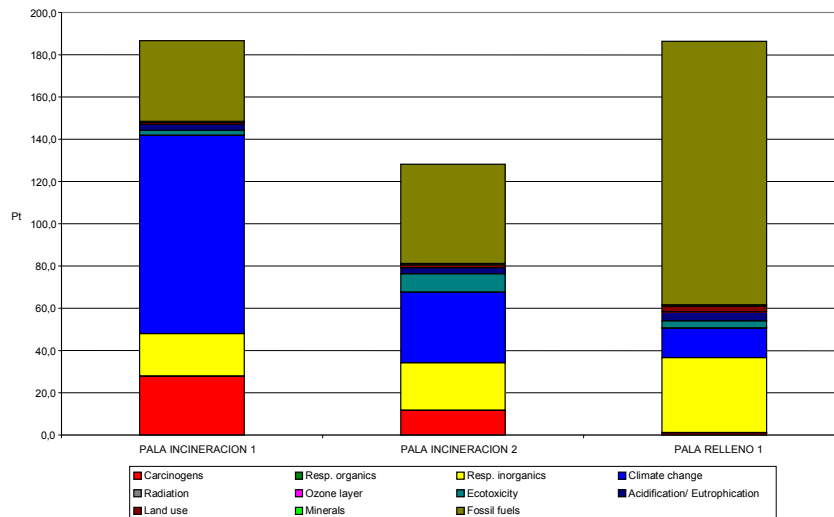


Figura 3: Comparación de resultados Escenarios 1-2 vs 3

#### Escenario 4. Reciclado Químico “Pirólisis”

En este caso, se ha considerado que la pala es trasladada en un camión de carga pesada, hasta la planta de tratamiento ubicada a 200 km del lugar de donde se encuentra el parque eólico. Dentro de la planta se realiza el 1° y 2° Mecanizado de corte, como los realizados en la incineración. Se reduce el material a partículas de 0.85 mm de diámetro. Este material alimenta en forma continua un 1° Horno Rotativo libre de oxígeno que se encuentra a una temperatura de 500° C. Donde se produce la pirólisis del plástico. En este proceso, se obtienen gases como: CO<sub>2</sub> y CO, los cuales presentan gran poder calorífico, líquidos como aceite y petróleo y un residuo sólido formado por fibras, cargas minerales y relleno. El residuo sólido pasa a un 2° Horno Rotativo, donde la fibra es limpiada en presencia de oxígeno, para su reutilización. Los metales son removidos por imanes para su reciclaje. El polvo se elimina y el cristal queda limpio. Las fibras de vidrio se mezclan con una pequeña cantidad de fibras de polipropileno y pasan a través de un horno. El PP se funde y conecta las fibras creando una fibra de vidrio lisa de aislamiento estable. Las fibras pueden separarse del residuo sólido utilizando una menor temperatura en el proceso (400° C), la presencia de vapor de agua, facilita la descomposición del polímero. Las fibras recuperadas han perdido el 50% de sus propiedades mecánicas. Se puede recuperar hasta un 30% de fibra de vidrio. Esta última será de menor calidad y presentará algunos contaminantes como por ejemplo: aceites y otros sólidos. Estas fibras son trasladadas en camiones para ser comercializadas como material de refuerzo. Por otro lado, la recuperación de energía se hace en forma de calor a partir de los gases de emisión que se liberan en el horno.

Las desventajas asociadas a esta operación son: un alto costo, el material reciclado tiene menor resistencia que el original por lo que no suele ser utilizado en la fabricación de nuevas palas. Entre las principales ventajas se pueden mencionar: alta recuperación de la energía y la recuperación de un gas combustible.

Finalmente, el producto obtenido se puede emplear en: materiales de aislamiento termo-resistentes, fibras de refuerzo en los rellenos, pegamentos y pinturas termoplásticas, materia prima para nuevos vidrios, materias primas para las fibras de vidrio (ReFiber ApS, 2007)

#### Escenario 5. Reciclado Químico “Lecho Fluidizado”

La pala es sometida a un 1° y 2° mecanizado de corte, como en el caso de la pirólisis. El material es reducido a partículas de 0.85 mm de diámetro. Luego, estas partículas alimentan un Horno de Doble Cámara donde se produce el proceso de lecho fluidizado. En este proceso se utiliza un lecho de arena de sílice. La arena se transforma en un fluido cuando es sometida a una corriente de aire caliente a alta velocidad. Las velocidades de fluidización típicas son 0.4-1.0 m/s a temperaturas que están en el rango de los 450-550 °C. En el lecho fluidizado, el polímero se volatiliza, liberándose las fibras y rellenos que luego se llevarán a la cuba de la cama, como partículas suspendidas. Las fibras están limpias y muestran muy poca contaminación de superficie. La resina epoxi requiere temperaturas mayores de volatilización, de hasta 550 °C, en comparación con las requeridas para la volatilización del polímero. La recuperación de energía se hace en forma de calor a partir de los gases de emisión que se liberan en el horno. El producto es una fibra de forma individual generalmente de filamentos de talla media, de 6 a 10 mm, cortas y de alta calidad. Las mediciones de propiedades mecánicas, indican que las fibras de vidrio recicladas suelen sufrir una reducción del 50% en resistencia a la tracción, pero mantienen la misma rigidez que la fibra virgen, cuando son transformadas a 450 °C. A temperaturas más altas (650°C), se aprecia una reducción de hasta el 90% de la resistencia mecánica. Estas fibras son trasladadas en camiones para ser comercializadas como material de refuerzo.

Una ventaja particular del proceso de lecho fluidizado, es que tolera materiales mixtos y contaminados. Así, la mezcla de compuestos de cualquier tipo de polímero puede ser procesada. Entre las desventajas se puede mencionar una menor recuperación de energía en comparación con el proceso de pirólisis y la necesidad de la reclasificación de la arena, utilizada en el proceso, para extraer los desechos. Finalmente, las aplicaciones más prometedoras de las fibras recuperadas son las que requieren las fibras cortas en una forma dispersa, como a granel (para relleno) o compuestos de moldeo, junto a fibras vírgenes largas.

En este escenario, el principal objetivo del proceso mencionado en la recuperación de la fibra de vidrio. En este caso, se recuperó un 65 % de la fibra, la cual es de menor calidad de la fibra original pero de mejor calidad y en mayor cantidad que la obtenida a través de la pirólisis. Además, esta fibra puede ser mezclada con fibra virgen para fabricar nuevas palas. La

proporción, normalmente aceptada, se encuentra en un máximo de 15 a 20% de fibra recuperada. Esto se debe a que estas fibras son más cortas que las fibras nuevas y tienen poca resistencia a la tracción y/o corte.

*Resultados Escenarios 4 vs 5*

Al comparar estos dos escenarios de reciclado químico, Figura 5, el proceso de pirólisis presentará un mayor impacto sobre el ambiente que el correspondiente al de lecho fluidizado. Además, se observa en la pirólisis tendrá una mayor contribución al impacto total por parte de las categorías: combustibles fósiles, carcinógenos y respirables inorgánicos. Por otro lado, el lecho fluidizado presenta una gran ventaja sobre la pirólisis, debido a que las fibras obtenidas a partir de este proceso serán de mejor calidad y podrán usarse para fabricar nuevas palas, reduciendo costos e impactos sobre el ambiente, al reducir la cantidad de fibra nueva que se tendrá que fabricar.

*Escenario 6*

*Reciclado Mecánico*

Este tipo de reciclado consiste en Reducir el producto a un estado de arena o de producto fibroso y luego reutilizarlo. En ambos casos, se emplea un Martillo que golpea la resina fuera de la estructura de la fibra. Luego de la fragmentación las fibras se actualizan por un método de reactivación, para lograr mejores propiedades a través de la unión química con la nueva matriz (Pickering, 2005).

Se emplea una Trituradora de 2,5 toneladas de capacidad, donde se reduce la FRP a 15 - 25 mm de diámetro, con daños internos mínimos para las fibras. Como subproducto se obtiene polvo o material fibroso. En el 1° caso, el polvo de materiales reciclados tiene un limitado potencial de reutilización en los compuestos termoestables de donde se originaron. Aunque son de menor densidad, las propiedades mecánicas son inferiores en los productos en los que se utilizan. Entre las principales aplicaciones se pueden mencionar: el uso en material de relleno, como reemplazo de carbonato de calcio y como refuerzo en el asfalto. En el 2° caso, el problema para reutilizar el FRP rallado es volver a enlazar las fibras con la nueva resina al quedar con restos de la resina anterior. Por lo tanto se necesita más tiempo que la resina virgen para obtener una buena unión. Los productos fibrosos reciclados tienen un gran potencial como material de refuerzo, pero no son tan buenos como el refuerzo de la fibra virgen, debido al cambio en sus propiedades mecánicas. Entre las aplicaciones se pueden mencionar el uso como refuerzo en el asfalto, el reemplazo de fibras cortas en combinación con fibras largas vírgenes, dentro de los compuestos termoestables.

Como desventaja, en ambos casos, se puede mencionar que en la molienda se utiliza una gran cantidad de energía, debido a la dureza del vidrio, la cual no se recupera, además el valor del material para relleno es bastante bajo, por lo que no es fácil que el proceso sea económico, a menos que encuentre una fuente de energía de menor costo.

Luego de un reciclado mecánico, las palas pueden haber sido compactadas o reducidas de tamaño, hasta llegar a formar polvos, por lo que dependiendo de las características de este producto, el mismo será empleado en relleno, como material de reemplazo de materia prima virgen o bien en el reúso.

*Escenario 7. Reúso*

Este escenario, plantea una opción de reutilización de las palas, donde a través de un mecanizado de corte (reciclado mecánico) se reduce mínimamente el tamaño de las mismas y posteriormente se plantean diferentes opciones de reúso. De donde, se eligió la fabricación de habitáculos para climas extremos.

*Resultados Escenarios 6 vs 7.*

En la figura 4 se comparan los últimos escenarios analizados. Se observa que en ambas alternativas se emplea la reducción de tamaño o reciclado mecánico, empleando mecanizado de corte, sin embargo cuando se plantea el reúso, debido a que la aplicación es específica (habitáculos), se realizaron un mínimo de cortes, lo que hace que esta alternativa tenga menor impacto.

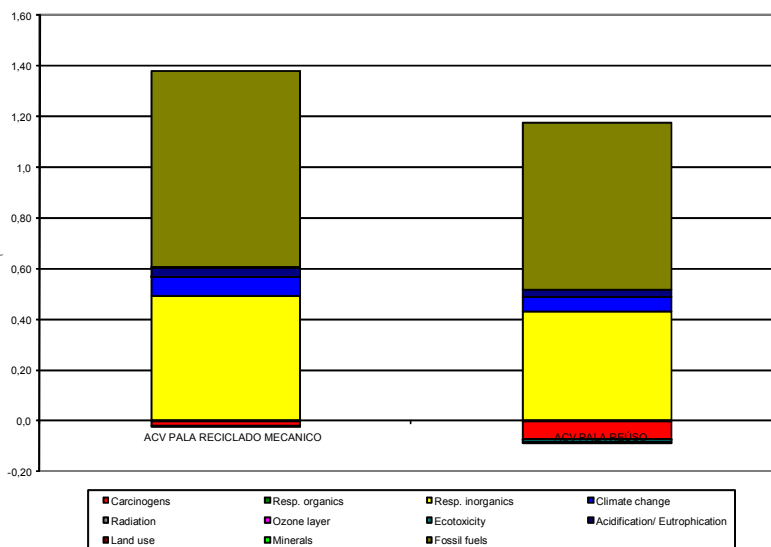


Figura 4: Comparación de resultados Escenarios 6 y 7

En la figura N°5 se muestran todos los escenarios analizados, donde la opción de reúso (habitáculos) y la de mecanizado son las que presentan menor impacto ambiental. Sin embargo, en la actualidad son las alternativas de relleno y de incineración las más empleadas como escenarios de disposición final para las palas de aerogeneradores.

Por otro lado, en la tabla N° 2 se muestran las consideraciones que se realizan normalmente para evaluar la etapa de fin de vida de un aerogenerador al realizar un ACV. En la misma se han especificado los escenarios planteados de acuerdo a los diferentes materiales que constituyen una turbina. Se puede observar que para el material de las palas, la fibra de vidrio se envía a relleno y los plásticos, entre los cuales se consideraría la resina epoxi, se incinera. Aunque, la tabla plantea escenarios muy generales, los mismos son frecuentemente considerados en diversos estudios de ACV hechos sobre turbinas eólicas (Martínez et al, 2009), lo que pone de relieve una importante falencia en este tipo de análisis. Así, dependiendo del tipo de escenario de disposición final elegido, será el impacto total del ciclo de vida del equipo en general o de las palas en particular. Por otro lado, es necesario distinguir entre las posibilidades teóricas de reciclaje de estos materiales y las que se pueden implementar en un lugar de acuerdo a la disponibilidad de la tecnología y a los costos de la misma.

En este aspecto, una de las mejores alternativas, es el reúso de las palas, evitando así el reciclado químico y térmico. El reúso presenta un abanico de posibilidades que va desde la utilización de las palas con un mínimo de cortes y accesorios, hasta la utilización de los mismos como materiales de relleno en otras aplicaciones.

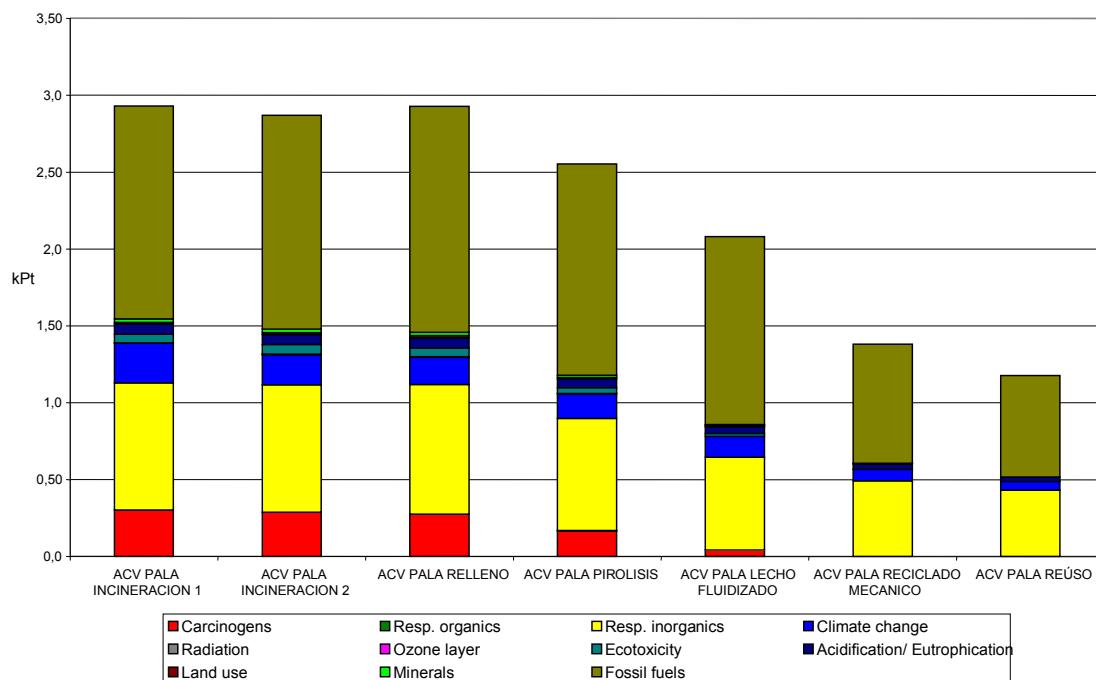


Figura 5: Comparación de los escenarios analizados

Material	Método de disposición final
Acero y hierro	90 % se Recicla (10 % Relleno)
Cobre	95 % se Recicla (5 % Relleno)
Aluminio	90 % se Recicla (10 % Relleno)
Fibra de vidrio	100% Relleno
Concreto	100 % Relleno
Plásticos	100 % Incinerados

Tabla 2: Disposición final de materiales

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se desprenden cuales serán las alternativas de fin de vida más convenientes desde el punto de vista del impacto ambiental. Sin embargo, es interesante señalar que las alternativas evaluadas son diferentes entre sí, en relación al tipo de producto que se obtienen al aplicar cada una de estas. De esta forma en algunos casos el material compuesto podrá ser recuperado, separado en sus materias primas originales total o parcialmente, otras solo será reducido de tamaño, o enterrado y en otros casos reusado. Debido a esto, es que sería conveniente ampliar el análisis de las diferentes vías de reciclado y reúso de los materiales empleados en las palas de un aerogenerador, considerando tanto el aspecto ambiental como el objetivo que se persigue al tratar por esa vía al material. Otro aspecto importante que no sido objeto de este trabajo, es la reducción y minimización de scrap (restos de materias primas) durante la etapa de fabricación de las palas de un aerogenerador, lo que se estima redundará en beneficios tanto ambientales como económicos. Lo mencionado hasta aquí, reafirma la importancia de evaluar los impactos ambientales de la tecnología eólica (aunque frecuentemente se considere que

la misma no contamina el ambiente al ser de base renovable) dado el crecimiento que han tenido las instalaciones eólicas en los últimos años y las perspectivas de crecimiento futuro.

## REFERENCIAS

- Recycling wind (2009). Reinforced Plastic. 0034-3617/09 ©2009 Elsevier Ltd.
- ISO 14040:1997(E) (1997). Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Standard Organization.
- ISO 14041:1998(E) (1998). Environmental management – Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis. International Standard Organization.
- ISO 14042:2000 (E) (2000). Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle impact assessment. International Organization for Standardization.
- ISO 14043:2000(E) (2000). Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation. International Organization for Standardization. Guinée, J. B. (ed); Handbook of Life Cycle Assessment: An operational guide to the ISO standards, 395-658, Kluwer Academics Publishers, Dordrecht, Holanda (2002).
- Sinden G. (2010). Life cycle assessment and renewable energies. BOU Proceedings – Climate Change and Birds. <http://www.bou.org.uk/bouproc-net/ccb/sinden.pdf>.
- Rivarola A., Arena P. A., Mattio H. (2007). Análisis de ciclo de vida de la turbina G47-660 kW. Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería. EnIDI 2007, Mendoza, Argentina.
- Rivarola A., Arena P. A., Mattio H. (2007). Evaluación de los impactos ambientales asociados al ciclo de vida de un aerogenerador. VI Conferencia y Exhibición Mundial de Energía Eólica, Mar del Plata, Argentina.
- Rivarola A., Arena P. A. (2008). Evaluación del daño a la salud humana causado por el ruido proveniente de aerogeneradores. Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería EnIDI 2008, Mendoza, Argentina.
- Rivarola A., Arena P. A., Mattio H. (2009). Application of a Methodological Proposal to study the Impact that Wind Turbine Noise has on human health. Case: Antonio Moran Wind Farm, Argentina. CILCA 2009. III International Conference on Life Cycle Assessment. Chile.
- G. Berrios, A. Rivarola<sup>2</sup>, A. P. Arena Grupo CLIOPE, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza. Evaluación Comparativa De Turbinas Eólicas De Gran Potencia Empleando Metodología De Análisis De Ciclo De Vida Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 13, 2009. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Batumba Nalukowe Barbara, Liu Jianguo, Wiedmer Damien, Lukawski Tomasz (2006). Life Cycle Assessment of a Wind Turbine. IN1800.
- IHOBE (1999): Sociedad Pública Gestión Ambiental del Gobierno Vasco, País Vasco, (Spain), Ecoindicador 99, translation of the practical manual of Ecodesign of PRÉ Consultants B.V., Mark Goedkoop, Suzane Effting and Marcel Collignon.
- Nigel Buchan (2002). University of Newcastle Visual Assessment of Windfarms Best Practice. Scottish Natural Heritage Commissioned Report F01AA303A.
- ReFiber ApS (2007). Material and thermal recycling of wind turbine blades and other fibreglass items.
- Pickering S.J. (2005). Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. School of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, The University of Nottingham, University Park, Nottingham NG7 2RD, UK
- Martínez E., Sanz V., Pellegrini S., Jiménez E., Blanco J. (2009). Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. Renewable Energy 34, 667–673.

**ABSTRACT:** Recently, wind industry has advanced on research and the employment of new materials for the equipment manufacturing. However, there has not been the same progress related to the final disposal of materials at the end of their life. This work proposes a Life Cycle Assessment (LCA) of turbine rotor blades. It presents seven alternatives of final disposal (two alternatives of Incineration, one of the Landfill, two of Chemical Recycling: Pyrolysis and Fluidized Bed respectively, one of Mechanical Recycling and one of Reuse). As main conclusions, we can identify those processes that will present the lowest environmental impact as an ended life alternative. They are the following: Chemical Recycling through Fluidized Bed, Mechanical Recycling and Reuse. Finally, the Reuse alternative is analyzing through a case that indicates how the rotor blades have been reused by minimizing: the energy consumed, the employment of additional materials and the waste generation.

**KEY WORDS:** turbine rotor blades, ended life stages, LCA (Life Cycle Assessment).

## AGRADECIMIENTO

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por La Fundación YPF y forma parte de la Tesis “Análisis de Ciclo de Vida de Sistemas Integrados de Energía de base eólica”