

Procedimiento para jerarquizar tecnologías para la generación de energía eléctrica a partir de residuos forestales en Venezuela.

---

Procedure for prioritizing technologies to generate electricity from forest residues in Venezuela.

**Aurelia Villasmil**<sup>1</sup>

**Monica Ilija**<sup>2</sup>

**Miguel Cabeza**<sup>2</sup>

Fecha de recepción: 25/10/2016

Fecha de aceptación: 14/06/2017

### Resumen

Se busca contribuir tanto a la gestión integral de residuos de origen forestal como a la solución del problema energético en Venezuela, al diseñar un procedimiento que permita jerarquizar -en función de criterios sociales, técnicos, ambientales y económicos-, la tecnología más apropiada para la producción de energía eléctrica a partir de residuos forestales provenientes de aserraderos, en un área geográfica definida. Para ello se formuló un flujograma de decisión que establece los pasos a seguir en el proceso de jerarquización, comenzando con la validación de criterios de exclusión; identificación de tecnologías y proveedores; selección, valoración y ponderación de indicadores de gestión, hasta llegar a la matriz de puntuación. A modo de validación, se aplicó el procedimiento a los aserraderos de la parroquia Chaguaramas del municipio Libertador del estado Monagas. Se evaluaron 5 tecnologías de combustión, y del proceso de jerarquización se obtuvo que la Caldera HERZ es la que presenta la condición más favorable. En función de los resultados se realizó un ajuste, que permite localizar de manera preliminar la planta de energía eléctrica en función de la distancia entre aserraderos y los residuos generados. Así, este procedimiento podría ser utilizado para tomar decisiones en proyectos de aprovechamiento energético de residuos forestales.

**Palabras claves:** residuos forestales, energía eléctrica, tecnologías, combustión.

---

<sup>1</sup>Instituto Forestal Latinoamericano (IFLA). aure2711@hotmail.com , Avenida principal Chorros de Milla, Núcleo Forestal. Edificio IFLA. Mérida, Venezuela Teléfono: 0274-2448906.

<sup>2</sup>Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). ULA. [ilija@ula.ve](mailto:ilija@ula.ve), Avenida Los Próceres, Parque de la Isla, Edificio CIDIAT. Mérida, Venezuela. Teléfono: 0274 2449511.

### Abstract

For contributing to the integrated forestry waste management as well as for solving the energy problem in Venezuela, a methodological procedure is designed for establishing a hierarchy -taking into account social, technical, environmental and economical criteria- between various technologies to find the most appropriate to produce electric energy from saw mills forestry wastes, in a specific geographic area. To this end, a decision flow chart was formulated, which establishes the steps to follow at the hierarchy process; starting with the validation of exclusion criteria; identification of technologies and suppliers; selection, valuation and weighting of management indicators, until finishing with the ranking matrix. To validate, the procedure was applied at the saw mills of the Chaguaramas County, Libertador Municipality at Monagas State. Five combustion technologies were evaluated, to finally determine the HERZ Boiler is the one with the most favorable condition. In the light of the results an adjustment was made, in order to be able to preliminary locate the electricity plant according to the distance between saw mills and the amount of waste generated. Then, this procedure could be used for decision-makers in projects formulated to capture energy from forestry wastes.

**Key words:** forestry waste, electric energy, technologies, combustion, flow chart.

### Introducción

Uno de los problemas ambientales más alarmantes a nivel global, tiene que ver con la alta dependencia de los combustibles fósiles para la generación de energía, y las consecuentes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se generan durante este proceso, responsables en parte del cambio climático. Aun cuando en Venezuela no se dispone de datos recientes sobre la producción de energía eléctrica a partir de combustible fósil, según la Cámara Venezolana de la Energía Eléctrica [Smith y Bracho, 2011], para finales de la década de los noventa la capacidad instalada de producción por plantas termoeléctricas representaba el 35 % del total de capacidad de producción eléctrica en el país. Por otra parte, Venezuela dispone de cuantiosas potencialidades de recursos hidroeléctricos, aprovechadas a través de plantas emplazadas en la región de Guayana y los Andes. Según Cúellar (2012), sólo la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar (Represa de Guri) genera el 60 % de energía del país, lo cual nos convierte en un país dependiente de la energía hidroeléctrica, la cual a su vez obedece a las condiciones climatológicas para su producción, en función del aumento o disminución del caudal, el cual se ve afectado por los efectos globales del cambio climático y por la fuerte intervención de la cuenca del Caroní, principal aportante del embalse; de allí que en nuestro país también debamos pensar en soluciones alternativas, ambientalmente amigables, para la generación de energía eléctrica.

En búsqueda de la adaptación a los objetivos del Protocolo de Kioto, distintos países han explorado diversas fuentes de energía no fósiles para reducir las emisiones a la atmósfera de los GEI. Dentro de esta perspectiva se encuentran el grupo de las energías renovables no convencionales, de las cuales según Granifo (2009), a nivel mundial en el 2006 estaban en primer lugar las provenientes de mini hidráulicas (36,2%), seguida de la energía eólica (32,4%) y por último la energía de biomasa con (24,2%).

Aunado a esta situación, en Venezuela también se presenta otro problema que se vive a nivel mundial, relacionado con el inadecuado manejo de los residuos sólidos, siendo una de las causas la ausencia de planes de manejo integral que incluyan el reúso y valorización de los mismos. En esta categoría se encuentran los residuos forestales, conformados por aquellos residuos que quedan en las instalaciones de procesamiento de la madera después del proceso de transformación primaria como son aserrín, corteza, virutas, recortes de madera, ramas y troncos; los dos últimos normalmente dejados en el bosque o en las plantaciones después del aprovechamiento forestal. En la actualidad, no existen planes de manejo integral para los residuos forestales, por lo que suelen acumularse en las áreas de aprovechamiento forestal y procesamiento de la madera, convirtiéndose en un problema por la disminución de las superficies disponibles para trabajar y el riesgo de generación de incendios. Adicionalmente, al no aprovechar completamente los bienes que se generan en el bosque, disminuye la sustentabilidad de la actividad forestal.

En tal sentido, América Latina ha venido incursionando en la búsqueda de nuevas fuentes de energía, en este caso en particular, partiendo del uso de los desechos de origen municipal, agroindustrial, forestal, y agrícola. En el caso concreto de la generación de energía eléctrica a partir de biomasa residual de origen forestal, el Instituto Forestal Latinoamericano, IFLA (2012) ha reportado la existencia en la región de al menos 46 plantas generadoras de electricidad que producen en total 812MW, de las cuales el 71,7% producen electricidad a partir de los residuos de la industria transformadora de la madera y el resto a partir de los residuos del aprovechamiento forestal de bosques y/o plantaciones (como se cita en [Smith y Bracho, 2011]).

Márquez y otros (2001), hacen énfasis que para la generación de energía a partir de biomasa forestal se debe partir de tratamientos físicos como fragmentación, secado y compactación; seguidas de procesos de conversión biológicos o termoquímicos, que varían de acuerdo a la materia prima que se utilice y el producto final que se desea obtener. Por otra parte, la biomasa se puede utilizar desde el punto de vista energético para distintas aplicaciones, dentro de las cuales Castaño (2010) y Nogués y Royo (2002), mencionan las siguientes: generación de energía térmica o eléctrica, combustible gaseoso

y biocombustible. Esta investigación se centró en el uso de la biomasa forestal para generación eléctrica, a través de procesos de conversión termoquímicos, aquellos que según Enersilva (2007), utilizan calor para la conversión de los residuos sólidos en productos gaseosos, líquidos y sólidos, paralelo a la emisión de energía en forma de calor. Dentro de los procesos de conversión termoquímica se tienen combustión, gasificación y pirolisis, y cada uno maneja distintos sistemas de transformación para obtener energía a partir de biomasa forestal.

Tchobanoglous y otros (1997), definen la combustión como el procesamiento térmico de los residuos sólidos mediante la oxidación química con exceso de oxígeno, para dar origen a dos tipos de productos: gases calientes de combustión y cenizas. La mayor ventaja de este proceso es la reducción en los costos de inversión y operación tanto de los equipos de combustión en sí mismo como de los equipos para el control de las emisiones atmosféricas, de allí que sea uno de los procesos más utilizados a nivel mundial. El calor generado puede ser utilizado directamente como energía térmica o puede ser procesado para generar energía eléctrica mediante el uso de calderas y expandiendo el vapor generado en turbinas de vapor. Existen distintas tecnologías o equipos para llevar a cabo la combustión de la biomasa como son: quemadores de parrilla fija ó móvil y plana ó inclinada; quemadores en pila o suspensión; lecho fluidizado burbujeante o circulante; calderas tubulares, piro-tubulares o acuotubulares.

Para Tchobanoglous y otros (1997), la gasificación es el proceso termoquímico más evolucionado, a través del cual se gasifica la biomasa mediante la combustión parcial de los residuos sólidos, para obtener un gas combustible que contiene monóxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos gaseosos. Para Barreto y otros (2010), una planta de gasificación esta constituida básicamente como una planta de combustión sustituyendo la caldera por el gasificador y el sistema de limpieza del gas. Finalmente, el gas generado se puede quemar en turbinas de gas y motores de combustión interna para generar calor y electricidad. Existen distintas tecnologías o equipos para llevar a cabo la combustión de la biomasa como son los gasificadores de lecho fijo de corriente ascendente o tiro directo, gasificadores de lecho fijo de corriente descendente o tiro invertido, gasificadores de lecho fluidizado y gasificadores de tiro transversal.

Finalmente, González (2009), define la pirólisis como un proceso que se realiza calentando la biomasa en ausencia de aire, con el objetivo de obtener mayores valores de potencia calorífica y densidad energética. Para autores como Tchobanoglous y otros (1997), la pirolisis es un proceso endotérmico que requiere de una fuente externa de calor y produce los siguientes componentes: una corriente de gas cuya composición depende del material pirolizado, y una fracción líquida que contiene ácido acético, acetona y metanol,

y puede usarse como aceite combustible. Este proceso de conversión actualmente se encuentra en fase experimental a nivel de laboratorio y en plantas piloto para determinar la cinética y los componentes desprendidos en el proceso.

Tomando en consideración lo descrito anteriormente, este trabajo busca contribuir tanto a la gestión integral de los residuos de origen forestal como a disminuir el problema energético en Venezuela, al formular un procedimiento que permita seleccionar el tipo de tecnología adecuada para el aprovechamiento energético de la biomasa forestal proveniente de las empresas de transformación de la madera, específicamente los aserraderos, en un área geográfica definida en Venezuela. De esta manera, se presenta una alternativa para la gestión de los residuos forestales con fines energéticos, la cual además de promover un manejo adecuado de los residuos, le da un valor agregado a los productos forestales; da un aporte a las políticas nacionales en la búsqueda de alternativas para la generación eléctrica a pequeña escala, que satisfaga las necesidades de las poblaciones que se encuentren aisladas o no cuenten con un servicio eléctrico definido; lo cual contribuye al desarrollo sostenible y la conservación del ambiente.

### **Materiales y Métodos**

El esquema metodológico empleado para alcanzar los objetivos planteados en la investigación, está constituido por cinco (5) fases, las cuales se muestran, de manera secuencial, en la Figura 1.

En la Fase 1, se recopiló información de libros especializados, artículos, documentos y páginas web elaborados por instituciones e investigadores, relacionados con la experiencias a nivel mundial en cuanto a la generación de energía eléctrica a partir de biomasa residual forestal; haciendo énfasis en la identificación de alternativas tecnológicas, considerando aspectos como: origen de los residuos utilizados, tratamientos y tecnologías usadas, cantidad de residuos, capacidad de generación, requerimientos de mano de obra, potencia instalada, rendimiento de producción, y población beneficiada.

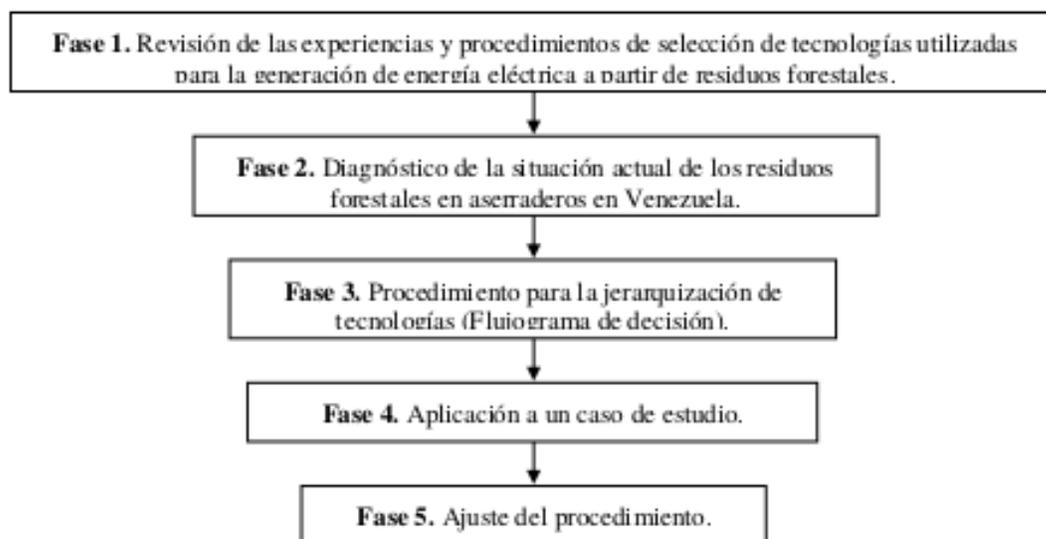


Figura 1: Esquema metodológico.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Fase 2 se realizó el diagnóstico de la situación actual de los residuos provenientes de los aserraderos en Venezuela, utilizando los datos generados de manera conjunta por el Ministerio del Poder Popular para las Industrias Básicas y Minería [MPPIBM, 2011], el Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica [MPPEE, 2013], y el Instituto Forestal Latinoamericano [IFLA, 2012]. En estos estudios se levantó la información de 87 aserraderos de un total de 112 reportados en los estados Cojedes, Lara, Portuguesa, Barinas, Anzoátegui, Bolívar y Monagas; resaltando aspectos como cantidad de aserraderos distribuidos en el país, abastecimiento de materias primas, producción de madera aserrada, especies procesadas, cantidad, tipo y características de los residuos generados así como el destino de los mismos. En función de los resultados generados en este diagnóstico, se elige el caso de estudio.

En la Fase 3 se enumeran los pasos a seguir, a través de un flujograma de decisión (ver Figura 2), para seleccionar tecnologías utilizadas para la conversión de biomasa residual forestal en energía eléctrica, tal como se detalla a continuación:

1. **Identificación de los criterios de exclusión** que servirán como primer filtro para determinar si el aprovechamiento de la biomasa residual forestal es viable o no.
2. **Identificación de las tecnologías** utilizadas para la conversión energética de los residuos forestales, así como los proveedores de las mismas, con la finalidad de recabar información acerca de las características propias de cada una de ellas, tales como capacidad nominal, eficiencia tecnológica, porcentaje de ceniza, emisión de gases y costo; que permita establecer los criterios de gestión a utilizar para evaluarlas.
3. **Identificación de los criterios de gestión** (sociales, técnicos, ambientales y económicos), y una serie de indicadores por cada criterio de gestión, tomando como referencia la información usualmente disponible para cada tecnología y estudios realizados por otros investigadores como Martínez (2009), ISOGIS Corp y otros (2010), y Toscano y Barriga (2009). En este paso se establece un sistema de evaluación de tecnologías a través de la asignación de rangos y valores a cada indicador de gestión, en función de la información disponible de cada tecnología y de las características del área de estudio, tal como se puede observar en la Tabla 1. La asignación de los valores para cada rango establecido en cada uno de los indicadores, se realizó tomando una escala nominal donde 3 es el valor más óptimo, 2 medianamente óptimo y 1 deficiente.

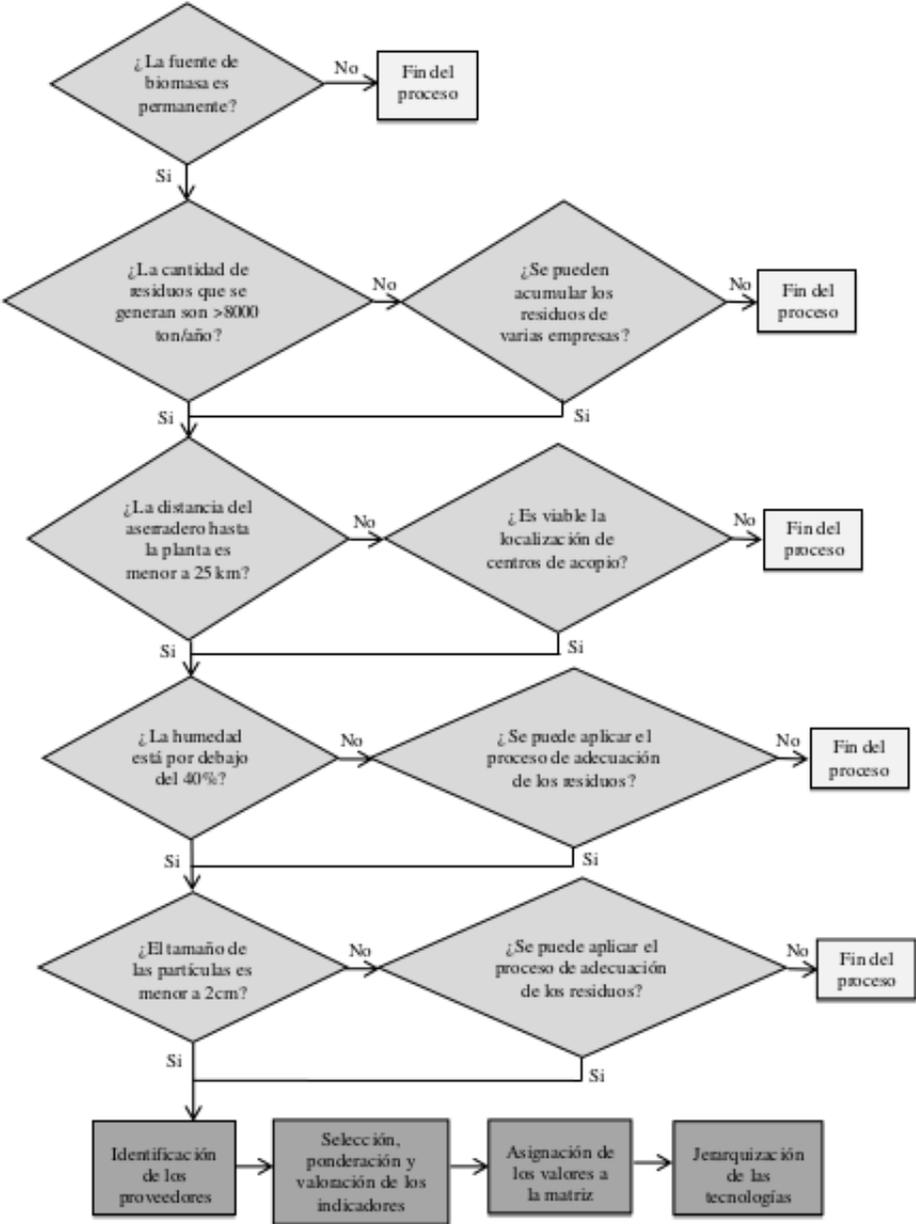


Figura 2: Flujograma de decisión.  
Fuente: Elaboración propia.

## Procedimiento para jerarquizar tecnologías para generación de energía eléctrica.

Tabla 1: Rangos y valores de los indicadores de gestión.

Indicador			
<b>Población Servida</b>	Pregunta	¿Cuál es el número personas beneficiadas por la generación de energía?	Valor
	Rangos	Menor a 100	1
		100-500	2
		>500	3
<b>Poder Calorífico del residuo</b>	Pregunta	Dentro de las características de los residuos ¿en qué rango se debe encontrar el poder calorífico (KJ/ Kg) recomendado?	Valor
	Rangos	Bajo <5000	1
		Medio 6000-15000	2
		Alto >15000	3
<b>Capacidad Nominal</b>	Pregunta	¿Cuál es capacidad nominal de generación de energía (MW)?	Valor
	Rangos	Menor a 1	1
		1-5	2
		>5	3
<b>Porcentaje de cenizas</b>	Pregunta	Dentro de las características de los residuos ¿cuál es el porcentaje de cenizas que puede generar?	Valor
	Rangos	>12	1
		12-4	2
		<4	3
<b>Eficiencia Energética</b>	Pregunta	¿Cuál es la eficiencia energética de la tecnología, en porcentaje?	Valor
	Rangos	>30	1
		30-75	2
		>75	3
<b>Emisiones de monóxido de carbono <math>CO_2</math></b>	Pregunta	¿Cuáles deben ser las emisiones de monóxido de carbono al aire ( $g/m^3$ ) durante el proceso de conversión?	Valor
	Rangos	Baja <10.000	3
		Media 10.000-40.000	2
		Alta >40.000	1
<b>Emisiones de óxido de nitrógeno <math>NO_x</math></b>	Pregunta	¿Cuáles deben ser las emisiones de óxido de nitrógeno al aire ( $g/m^3$ ) durante el proceso de conversión?	Valor
	Rangos	Baja <1	3
		Media 1-149	2
		Alta >150	1
<b>Emisiones de dióxido de azufre <math>SO_2</math></b>	Pregunta	¿Cuáles deben ser las emisiones de dióxido de azufre al aire ( $g/m^3$ ) durante el proceso de conversión?	Valor
	Rangos	Baja <100	3
		Media 100-365	2
		Alta >365	1
<b>Emisiones de sulfuro de hidrógeno <math>H_2S</math></b>	Pregunta	¿Cuáles deben ser las emisiones de sulfuro de hidrógeno al aire ( $g/m^3$ ) durante el proceso de conversión?	Valor
	Rangos	Baja <5	3
		Media 5-19	2
		Alta >20	1
<b>Nivel de Ruido</b>	Pregunta	Cuál es el nivel de ruido (dBA) permitido generado en el proceso de conversión?	Valor
	Rangos	<60	3
		61-130	2
		>31	1
<b>Inversión requerida</b>	Pregunta	¿En cuánto puede oscilar la inversión requerida, en millones de dólares (MUSD), para adquirir, operar y mantener la tecnología?	Valor
	Rangos	<15	3
		16-30	2
		>31	1

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, los indicadores se sometieron a una consulta de 25 expertos con el objetivo de conocer el nivel de importancia que le asignarían en un proceso de selección de tecnologías, en función de la siguiente escala: Importancia baja = 1, Importancia media = 2 e Importancia alta = 3. De esta manera, al promediar los valores de las respuestas recibidas, se obtuvo la ponderación (P) de los indicadores, que se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Ponderación de los indicadores de gestión.

Crterios	Indicadores	Ponderación
Sociales	Población servida (habitantes)	0,090
Técnicos	Poder calorífico del residuo (KJ/ Kg)	0,083
	Capacidad nominal (MW)	0,090
	Porcentaje de cenizas (%)	0,078
	Eficiencia energética (%)	0,098
Ambientales	Emisiones de monóxido de carbono $CO_2(g/m^3)$	0,097
	Emisiones de óxido de nitrógeno $NO_x(g/m^3)$	0,097
	Emisiones de dióxido de azufre $SO_2(g/m^3)$	0,097
	Emisiones de sulfuro de hidrógeno $H_2S(g/m^3)$	0,097
	Nivel de ruido (dBA)	0,073
Económicos	Inversión requerida (M USD)	0,100

Fuente: elaboración propia.

4. Para la **jerarquización de las tecnologías** se formuló una matriz de puntuación de la siguiente manera (ver Tabla 3):

- En la primera y segunda columna, se colocan los criterios e indicadores de gestión establecidos en el Paso 3, respectivamente.
- En la tercera columna se coloca la ponderación (P) de cada uno de los indicadores de gestión, obtenida de la consulta de expertos.
- Para cada tecnología se procede a la evaluación de los indicadores y la asignación de valores (V), en función de la información disponible por parte de los proveedores. Luego se anota en la columna (V x P) el resultado de multiplicar el valor de la columna V por el valor de ponderación P de cada indicador.
- Se realiza un sumatoria de los valores (V x P) de todos los indicadores para cada una de las tecnologías evaluadas. El orden de prioridad (jerarquización) queda establecido en función de la puntuación total que alcanza cada tecnología, el mayor valor indica mejor aptitud o condición más favorable.

## Procedimiento para jerarquizar tecnologías para generación de energía eléctrica.

Para completar el esquema, y en función de los resultados emanados de la Fase 2, correspondiente al diagnóstico de los residuos forestales que se generan en Venezuela, en la Fase 4 se aplica la metodología a un caso de estudio, con el propósito de validarla, y poder realizar ajustes al procedimiento propuesto en la Fase 5, de ser necesario.

Tabla 3: Matriz de puntuación del caso de estudio.

Criterios	Indicadores	Ponderación	Caldera de Biomasa		Caldera CmT/F		Caldera BIOTEC		Caldera EOS		Caldera HERZ	
			V	V x P	V	V x P	V	V x P	V	V x P	V	V x P
<b>Sociales</b>	<b>Población Servida</b>	0,090	3	0,27	2	0,180	1	0,090	3	0,270	2	0,180
<b>Técnicos</b>	Poder Calorífico del residuo	0,083	1	0,083	1	0,083	1	0,083	1	0,083	1	0,083
	Capacidad nominal	0,090	2	0,179	3	0,269	2	0,179	3	0,269	3	0,269
	Porcentaje de cenizas	0,078	2	0,157	3	0,235	3	0,235	3	0,235	3	0,235
	Eficiencia energética	0,098	2	0,197	3	0,295	3	0,295	3	0,295	3	0,295
<b>Ambientales</b>	Emisiones de monóxido de carbono $CO_2$	0,097	2	0,194	2	0,194	2	0,194	1	0,097	3	0,291
	Emisiones de óxido de nitrógeno $NO_x$	0,097	2	0,194	2	0,194	2	0,194	1	0,097	3	0,291
	Emisiones de dióxido de azufre $SO_2$	0,097	2	0,194	3	0,291	2	0,194	1	0,097	3	0,291
	Emisiones de sulfuro de hidrógeno $H_2S$	0,097	2	0,194	2	0,194	2	0,194	1	0,097	3	0,291
	Nivel de Ruido	0,073	2	0,145	3	0,218	1	0,073	2	0,145	2	0,145
<b>Económicos</b>	<b>Inversión Requerida</b>	0,100	3	0,299	2	0,199	3	0,299	2	0,199	1	0,100
			Total	2,104		2,351		2,029		1,883		2,470

Fuente. Elaboración propia.

## Resultados

En cuanto a la revisión de las distintas experiencias a nivel mundial se tiene que países como España, Cuba, Chile, Panamá, China, y Brasil entre otros utilizan distintas

alternativas tecnológicas para la generación de energía a partir de residuos forestales, entre las que destacan la gasificación, pirolisis y combustión, siendo esta última la más utilizada por las distintas plantas para la generación de electricidad o calefacción a través de calderas, mientras que la gasificación y pirolisis a gran escala aún están siendo desarrolladas en los países industrializados.

En cuanto al diagnóstico de la situación actual, el IFLA (2012) recopiló información de 87 aserraderos de un total de 112 reportados, que permitió la cuantificación de los residuos forestales, distribuidos en las siguientes regiones: occidental, oriental, sur y sur occidental. En la Figura 3 se puede observar que la mayor generación de residuos forestales se encuentra en la región oriental, en los estados Anzoátegui y Monagas con un 74,87%; seguida de la región sur representada por el estado Bolívar con un 19,97%; la región occidental enmarcada en los estados Lara, Cojedes y Portuguesa con una generación de residuos de 3,72% y para finalizar la región sur-occidental representada por el estado Barinas que genera solo el 1,44%.

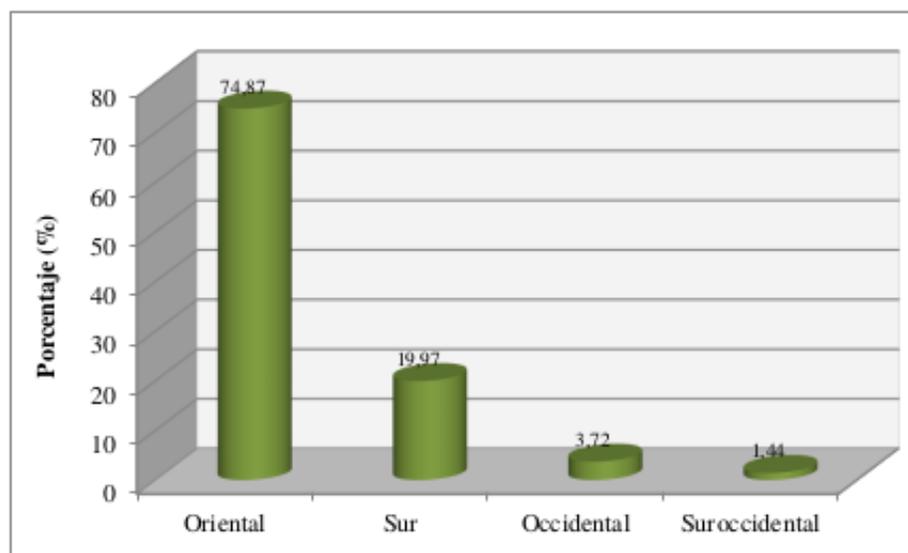


Figura 3: Generación de residuos por regiones.  
Fuente: Elaboración propia, con base en datos de IFLA (2012).

En lo que se refiere a las especies de madera, las más aprovechadas en el país son *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* (pino caribe), *Tectona grandis* (teca), *Gmelina arborea* (melina), *Samanea saman* (samán), *Pterocarpus acapulcensis* (drago), *Spondias mombin* (jobo), *Sterculia apetala* (camoruco), *Platymiscium pinnatum* (roble), *Hymenaea courbaril* (algarrobo), *Peltogyne porphyrocardia* (zapatero), *Tabebuia serratifolia* (puy) y

algunas especies de *Eucalyptus sp.* (eucalipto), que provienen de plantaciones forestales, hatos agropecuarios, fundos privados y del aprovechamiento de bosques naturales.

Los residuos forestales generados son similares en la mayoría de los casos: corteza, aserrín, viruta, despuntes y varillas. En cuanto al uso que se le da a esta biomasa residual, los aserraderos generalmente no utilizan este recurso para su beneficio, generalmente son acumulados en el sitio, para luego ser quemados en forma no controlada o trasladados a los vertederos municipales, con lo cual se reduce la vida útil de los mismos; en otros casos una fracción se vende a empresas que los utilizan para recuperar tableros y machihembrado, fabricantes de guacales o artesanos; o son donados a granjas de pollo, caballerizas, talleres mecánicos, criaderos de cochinos y otros similares.

De acuerdo a los datos levantados en los siete estados estudiados, existe una capacidad instalada para la transformación primaria y secundaria de la madera del orden de  $1.009.490m^3/año$ , de la cual se procesa anualmente un aproximado de  $562.759m^3$  de madera en rolas que son transformados en  $385.356m^3/año$  de madera aserrada más una fracción equivalente a  $178.963m^3/año$  que se pierde y que corresponde a la de biomasa residual actual, la cual pudiera aumentar hasta a  $291.135,90m^3/año$  si los aserraderos que actualmente están en operaciones trabajaran al 100 % de su capacidad [Smith y Bracho, 2011].

Para la jerarquización de las tecnologías y siguiendo la secuencia de pasos establecida en el flujograma de decisión de la Figura 2, se comienza evaluando la viabilidad del aprovechamiento energético de los residuos forestales a través de los denominados criterios de exclusión y de ser positivos los resultados, se continúa con los siguientes pasos. Estos criterios de exclusión fueron definidos de la siguiente manera: a la hora de plantear la instalación de una planta de generación de energía eléctrica a partir de residuos forestales, la fuente de biomasa debe ser permanente; la cantidad mínima debe ser 8000 ton/año, siendo ésta la cantidad necesaria para generar 1MW de energía eléctrica (se propone la opción de acumular los residuos provenientes de distintos aserraderos); la distancia máxima debe ser de 25 km desde los aserraderos hasta la planta de generación de energía o de otra manera se incrementarían notablemente los costos de transporte (para distancias mayores se recomienda aplicar un radio de 25 km que permitirá establecer un área común para varios aserraderos y ubicar uno o más centro de acopios); finalmente se toman en cuenta características preliminares de los residuos sólidos forestales como son la humedad (para ser utilizados como combustible para la generación de energía deben tener una humedad por debajo del 40 %, en caso contrario se propone la incorporación de pre-tratamientos como el secado de los residuos) y el tamaño de las partículas (el tamaño recomendado es de 2 cm de longitud máxima, en caso contrario se debe acondicionar la

biomasa para reducir la granulometría, a través de procesos de acondicionamiento como triturado, astillado y compactación).

A fin de validar el proceso metodológico descrito y plasmado en el flujograma de decisión, se aplicó un caso de estudio en la parroquia Chaguaramas del municipio Libertador del estado Monagas, por formar parte de la región oriental en la cual se generaban para el 2012 el 74,87% de los residuos sólidos forestales del país [IFLA, 2012]. En el municipio Libertador se encuentra el 70% de los aserraderos del estado, cuenta con el 31% de la capacidad instalada total y produce el segundo más alto porcentaje de biomasa residual [Smith y Bracho, 2011]. En cuanto a población, la parroquia Chaguaramas es una de las cuatro parroquias del municipio Libertador y según el último censo, tenía una población de 3.380 habitantes y aproximadamente 845 viviendas [INE, 2011].

En la parroquia Chaguaramas se localizan 23 de los 36 aserraderos de la zona oriental, los cuales se encuentran relativamente cerca uno de otro, con distancias que oscilan entre 1 y 3 km. Según IFLA (2012), estos aserraderos generan aproximadamente 25.168 ton/año de residuos sólidos forestales, lo cual representa el 21,22% del total generado en el país.

La principal madera procesada en la parroquia es el pino caribe proveniente de las plantaciones forestales. Tal como se comentó anteriormente, los residuos generados generalmente son acumulados en el sitio, para luego ser quemados en forma controlada o trasladados a los vertederos municipales, como se ve en la Figura 4.

La Dirección General de Energías Alternativas del Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica [MPPEE, 2013], realizó análisis a los residuos sólidos forestales provenientes de los aserraderos de la parroquia Chaguaramas. De estas muestras se obtuvieron algunos datos referenciales de humedad, contenido de cenizas, poder calorífico, entre otros y se muestran en la Tabla 4. El tamaño de las partículas se encuentra entre 0,1 y 2cm.



Figura 4: Residuos acumulados en los aserraderos de la parroquia Chaguaramas, municipio Libertador, estado Monagas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4: Características físico-químicas de los residuos forestales de la parroquia Chaguaramas.

Características de los residuos	Aserrín	Corteza	Astillas
Contenido de cenizas	0,01	0,06	0,28
Nitrógeno total	80,20	91,67	82,49
Humedad (%)	19,32	6,34	17,91
Cloruros	57	5,83	147
Azufre (%)	0,01	$6,50 \times 10^{-3}$	$3,80 \times 10^{-3}$
Poder calorífico PCS Kj/Kg	1653	965	1158

Fuente. Dirección General de Energías Alternativas del Ministerio del Poder Popular de Energía Eléctrica (2013).

Para realizar la jerarquización de las tecnologías, que pueden ser utilizadas en el proceso de generación de energía a partir de los residuos sólidos forestales en la parroquia Chaguaramas del estado Monagas, se siguió la secuencia establecida en el flujograma de decisión propuesto, tal como se describe a continuación.

En primer lugar se evaluaron los criterios de exclusión de la siguiente manera:

- Se asume que los residuos provenientes de los aserraderos se producen de manera constante ya que en Chaguaramas se desarrolla la actividad industrial maderera durante todo el año.
- En los aserraderos registrados en la parroquia se producen un total de 25.168 ton/año; sin embargo, la producción máxima individual por aserradero es de 3.441

ton/año por lo que se propone agrupar todos los aserraderos en función de una sola planta o reunir los aserraderos en grupos hasta alcanzar el mínimo de 8000 ton/año que garanticen el funcionamiento de una planta por cada grupo. En la Figura 5 se agruparon los aserraderos en tres grupos, en función de su producción.

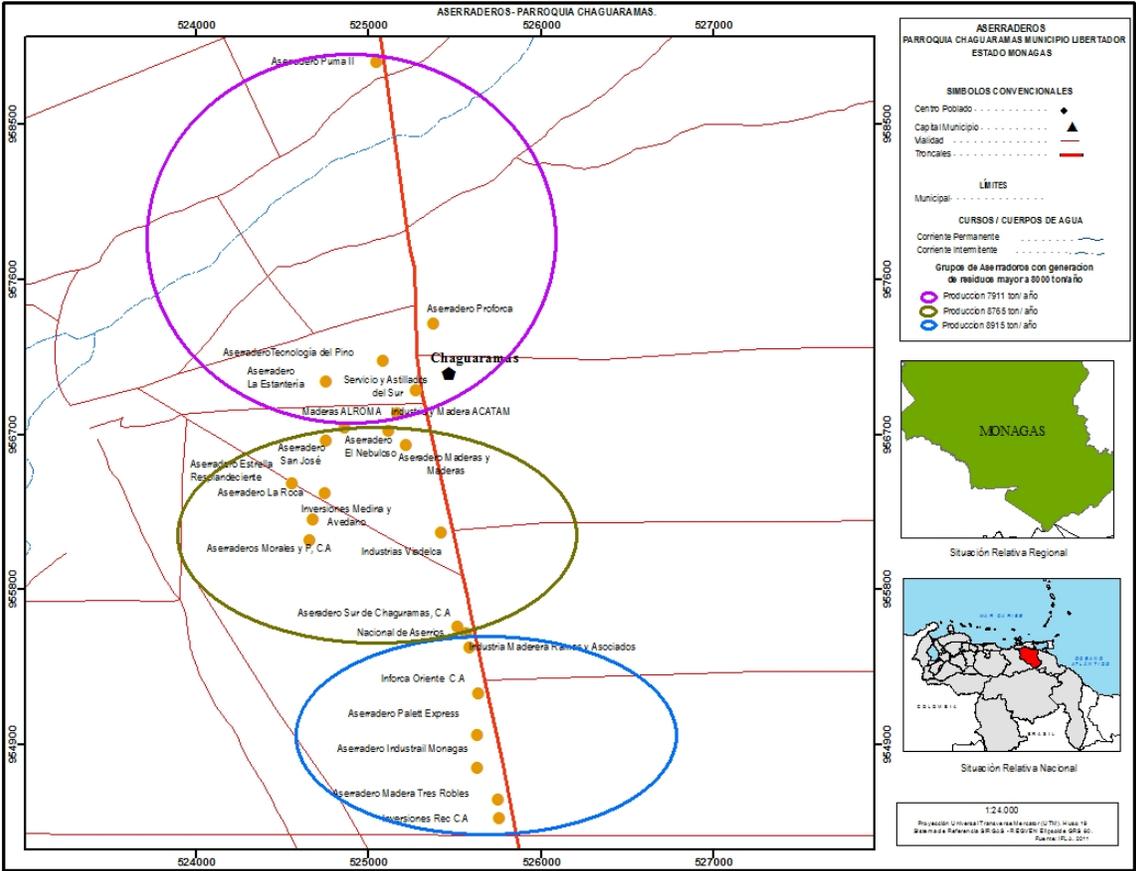


Figura 5: Agrupación de aserraderos en función de su producción en la parroquia Chaguaramas del municipio Libertador del estado Monagas.

Fuente: Elaboración propia, con base en datos de IFLA (2012).

- La distancia máxima para localizar la planta de generación es de 25 km desde cada empresa maderera. Como ajuste al procedimiento se propuso determinar la posible ubicación de la planta de generación eléctrica, para lo que se aplica un radio de 25 km a cada aserradero para encontrar un área de intersección común. En este caso en particular, como los aserraderos se encuentran muy cerca uno de otro, con distancias que oscilan entre 1 y 3 km, se calculó un centroide utilizando la herramienta ArcMap

## Procedimiento para jerarquizar tecnologías para generación de energía eléctrica.

para ofrecer un sitio preliminar de ubicación de la planta, tal como se muestra en la Figura 7.

- En cuanto a las características físico-químicas de los residuos sólidos forestales se tiene que la humedad oscila entre 6 y 20 %, es decir está por debajo del 40%; mientras que el tamaño de residuos como el aserrín es menor a 2 cm, pero las cortezas y costaneras tienen tamaños mayores, por lo que se deben acondicionar para disminuir el tamaño.

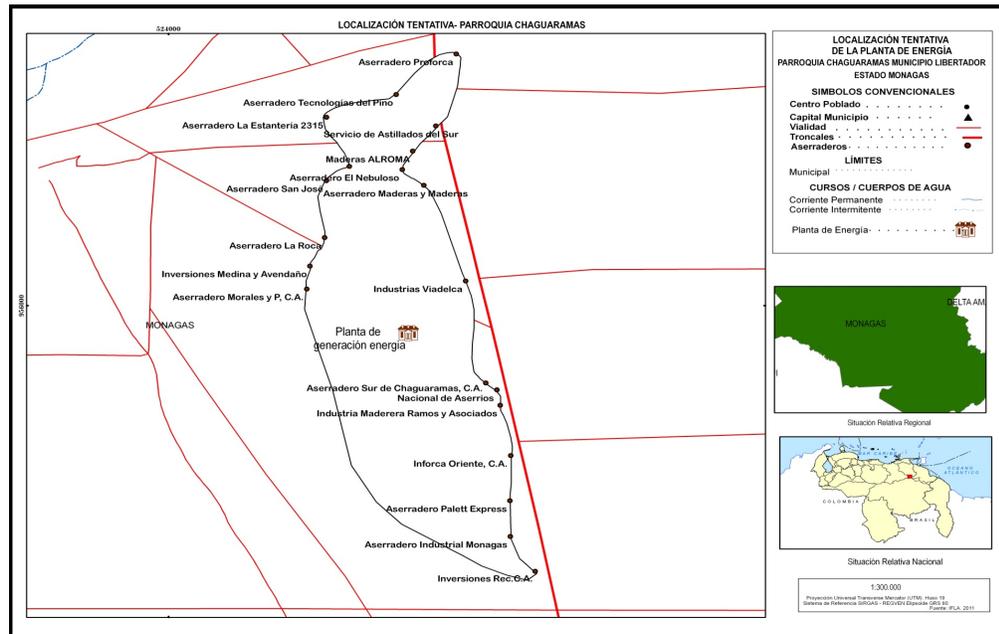


Figura 6: Localización tentativa de la planta de generación de energía eléctrica a partir de residuos forestales en la parroquia Chaguaramas del municipio Libertador del estado Monagas.

Fuente: Elaboración propia.

Establecida la viabilidad del aprovechamiento energético de los residuos sólidos forestales, se identificaron los proveedores de las tecnologías que son utilizadas para la conversión energética de los mismos, con énfasis en las tecnologías de combustión, por ser las más utilizadas en la generación de energía eléctrica a escala comercial. En este sentido se evaluaron cinco tipos de tecnologías: calderas CmT/F, BIOTEC y EOS cuyo proveedor es el Grupo Nova Energía; caldera HERZ cuyo proveedor es Erorbi S.L. y la caldera de biomasa del proveedor Henan Yuanda Boiler Co. Con la información recabada, se procedió a realizar la asignación de los valores (V) de cada uno de los indicadores de

gestión, en función de las características generales de la parroquia Chaguaramas y de las tecnologías evaluadas.

Una vez obtenidos los valores (V) para cada tecnología, estos fueron incorporados en la matriz de puntuación que se muestra en la Tabla 3, junto con la ponderación (P) obtenida de la consulta de expertos, lo que permitió realizar la jerarquización de las tecnologías que se muestra en la Figura 6, donde se observa el orden prioridad de las cinco tecnologías en función de la puntuación total obtenida, siendo la caldera HERZ la que presenta mejor aptitud o la condición más favorable para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos forestales en la parroquia Chaguaramas.



Figura 7: Jerarquización de las tecnologías.  
Fuente: Elaboración propia.

## Discusión

Los resultados obtenidos en el diagnóstico reflejan que en Venezuela se genera una cantidad considerable de residuos sólidos forestales provenientes de los aserraderos, de los cuales la mayor parte se pierde al quedarse acumulados en las adyacencias de las distintas empresas, al ser dispuestos sin control en vertederos municipales con lo cual se reduce la vida útil de los mismos, o quemados de forma no controlada, lo que se traduce en emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. De ser potencialmente utilizables, las 118.595 ton/año de residuos sólidos forestales servirían para generar a través de distintos procesos de conversión termoquímicos como gasificación, pirolisis y combustión, aproximadamente 14

MW de energía, beneficiando aproximadamente 100.000 viviendas. El aprovechamiento de estos residuos contribuiría no sólo a reducir significativamente los problemas que genera el manejo inadecuado de los mismos, como es el acortamiento de la vida útil de los vertederos municipales y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera; sino también mejoraría la oferta de electricidad local y nacional lo cual, en el caso particular de Venezuela, presentaría una alternativa ante la dependencia actual de las fuentes de energía hidroeléctrica.

En este sentido, esta investigación se centró en el desarrollo de un procedimiento que permite jerarquizar, en función de criterios sociales, técnicos, ambientales y económicos, la tecnología más apropiada entre varias, para el aprovechamiento energético de residuos sólidos forestales en un determinado sitio. Para ello se formuló un flujograma de decisión que permite establecer de manera secuencial los pasos a seguir en el proceso de jerarquización.

A modo de validación, se aplicó el procedimiento tomando como caso de estudio la parroquia Chaguaramas del municipio Libertador del estado Monagas, en virtud que ésta tiene un número considerable de aserraderos que generan aproximadamente 25.168 ton/año, además de ser el área de posible instalación de una planta de generación de energía por parte del MPPEE. Se evaluaron 5 tecnologías de combustión, y del proceso de jerarquización se obtuvo que la Caldera HERZ es la que presenta mejor aptitud o la condición más favorable. Como ajuste al procedimiento se determinó la posible ubicación de la planta de generación eléctrica, aplicando un radio de 25 km a cada aserradero para encontrar un área de intersección común. En este caso en particular, como los aserraderos se encuentran relativamente cerca uno de otro, con distancias que oscilan entre 1 y 3 km, se unieron con líneas los aserraderos y se calculó el centroide de la figura generada utilizando la herramienta ArcMap, y en éste punto ubicar la planta, tal como se muestra en la Figura 7.

### Conclusiones y recomendaciones

Este proceso metodológico se puede utilizar, con los ajustes pertinentes, en la toma de decisiones a nivel de pre-factibilidad del proyecto de instalación de una planta de generación eléctrica en el sitio, considerando que la producción de residuos sólidos forestales es constante, y que poseen propiedades caloríficas adecuadas.

En virtud de los resultados obtenidos se hacen las siguientes recomendaciones, que pudieran mejorar el proceso de jerarquización de las tecnologías y la calidad de los resultados obtenidos:

- Aprovechar además de los residuos generados en los aserraderos, aquellos dejados en campo durante el aprovechamiento forestal, decisión que permitiría incrementar la generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos forestales en el país.
- Mejorar el sistema de almacenamiento de los residuos forestales, lo cual permitiría un mayor aprovechamiento de los mismos, ya que hoy en día no es mucho lo que se puede aprovechar del volumen acumulado debido al proceso de biodegradación de los mismos, principalmente por las condiciones y el prolongado tiempo de almacenamiento.
- Incluir otros criterios de exclusión, por ejemplo tomar en cuenta la distancia desde la planta de generación eléctrica hasta el sitio de aprovechamiento de la misma, para ver si es viable desde el punto de vista económico.
- Incluir otros indicadores de gestión para darle más peso al proceso de jerarquización de las tecnologías, los cuales van a depender de la información disponible acerca de cada uno de los paquetes tecnológicos a ser evaluados. En este sentido, es recomendable desarrollar un anteproyecto de instalación de una planta de generación de energía que contenga las especificaciones del tipo de combustible que se piensa utilizar y la potencia que es necesaria generar, ya que de esta manera hay más probabilidades de recibir la información y cotizaciones de las tecnologías por parte de los proveedores.
- En lugar de utilizar valores generales, se recomienda realizar un análisis de los residuos sólidos forestales generados en cada uno de los aserraderos para determinar sus características físico-químicas, a fin de conocer el potencial energético de los mismos con mayor precisión, además de determinar la necesidad o no de la incorporación de tecnologías adicionales para la adecuación de los mismos.

## Bibliografía

- [Barreto et al. 2010] Barreto, L., Batalla, C., Ferraro, G., García, M., y Peña, A. (2010). *Aprovechamiento energético de residuos sólidos de curtiembre*. En XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Química. Montevideo, Uruguay. Recuperado el 12 de noviembre de 2013 en <http://aiquruguay.org/congreso/download/TL38.pdf>
- [Castaño, 2010] Castaño, N. (2010). *Estrategia Española para el desarrollo del uso energético de la biomasa forestal residual*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. España. Recuperado el 07 de octubre de 2013 en [http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/publicaciones/Estrategia\\_Biomasa\\_Forestal\\_Residual\\_Marzo\\_2010\\_tcm7-299297.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/publicaciones/Estrategia_Biomasa_Forestal_Residual_Marzo_2010_tcm7-299297.pdf)

- [Cúellar, 2012] Cúellar, H. (2012). *Atlas Artístico de la República Bolivariana de Venezuela*.
- [ENERSILVA, 2007] ENERSILVA. (2007). *Proyecto Enersilva: promoción del uso de la biomasa con fines energéticos en el suroeste de Europa*. Recuperado el 10 de febrero de 2012 en <http://enersilva.navegantes.info/areasubir/resultados/Enersilva%20espanol.pdf>
- [González, 2009] González, J. (2009). *Energías Renovables*. Editorial Reverte. Barcelona, España.
- [Granifo, 2009] Granifo, R (2009). *Recuperación de los residuos de la madera para uso energético en la región metropolitana. Facultad de ecología y recursos naturales*. Universidad Andrés Bello. Chile. Recuperado el 18 de enero de 2013 en <http://www.chileresiduos.cl/chileresiduos/userfiles/file/tesis%20granifo%20residuos%20madera.pdf>.
- [IFLA, 2012] Instituto Forestal Latinoamericano. (2012). Inventario, caracterización y evaluación de biomasa residual seca de origen forestal como fuentes alternas para la generación de energía eléctrica. **Instituto Forestal Latinoamericano**. Mérida, Venezuela.
- [INE, 2011] Instituto Nacional de Estadística. (2011). *Censo de Población y Vivienda*.
- [ISOGIS CORP] ISOGIS CORP, The Pembina Institute, Instituto Tecnológico De El Salto Y The Carbon Basis Company LTD. (2010). *Evaluación de la Madera, la Biomasa y el Carbono de Bosques y las Tecnologías Potenciales de Producción de Energía a Partir de Biomasa en Durango*, México. Recuperado el 1 de julio de 2012 en <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs9/1107Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Madera,%20la%20biomasa%20y%20el%20carbono%20de%20bosques%20y%20las%20tecnolog%C3%ADas%20potenciales...pdf>
- [Márquez et al. 2001] Márquez, F., Cordero, T., Rodríguez, J., y Rodríguez, J. J. (2001). Estudio del potencial energético de biomasa *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* (Pc) y *Pinus tropicalis* Morelet (Pt); *Eucalyptus saligna* Smith (Es), *Eucalyptus citriodora* Hook (Ec) y *Eucalyptus pellita* F. Muell (Ep); de la provincia de Pinar del Río. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 7(1): 83-89.
- [Martínez, 2009] Martínez, S. (2009). *Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña*. Tesis Doctoral. Universidad de Girona, España. Disponible en <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7920/tsml1de1.pdf?sequence=1>

- [MPPEE, 2013] Ministerio Del Poder Popular Para La Energía Eléctrica. (2013). Anuario Estadístico 2013 del Sector Eléctrico Venezolano. *Oficina de Planificación, Presupuesto y Organización*. Coordinación de Estadística. Caracas, Venezuela.
- [MPPIBM, 2011] Ministerio Del Poder Popular Para Las Industrias Básicas y Minería. (2011). Directorio nacional de industrias forestales. Dirección General de Industrias Madereras. Caracas, Venezuela.
- [Smith y Bracho, 2011] Smith, S. y Bracho, Y. (2011). Aprovechamiento de la biomasa residual seca, una alternativa para la generación local de energía eléctrica en Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana*, 26(1): 25-42
- [Tchobanaglou et al. 1997] Tchobanaglou, G., Theisen, H., y Vigil, S (1997). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. McGraw Hill. España.
- [Toscano y Barriga, 2009] TOSCANO, L. y BARRIGA, A. 2009. *Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de biomasa* (aplicación a biomasa locales típicas). Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Guayaquil, Ecuador. Disponible en <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/337>