



**DIRECTRICES PARA EL
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO
DE LA MADERA DE RESIDUOS DE
ACTIVIDADES FORESTALES Y DE
PODA URBANA, EN PARAGUAY**

Juan Fernando Borja Robertti
2019



MINISTERIO DE
OBRAS PÚBLICA
Y COMUNICACIONES

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JUAN FERNANDO BORJA ROBERTTI

Directrices para el aprovechamiento energético de la madera de residuos de actividades forestales y de poda urbana, en Paraguay.

São Carlos

2019

JUAN FERNANDO BORJA ROBERTTI

Directrices para el aprovechamiento energético de la madera de residuos de actividades forestales y de poda urbana, en Paraguay.

Monografia apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para conclusão do curso de Especialização em Impactos Ambientais de Obras de Infraestrutura.
Orientador: Prof. Senior Valdir Schalch

São Carlos

2019

AUTORIZO LA REPRODUCCIÓN Y DIVULGACIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE TRABAJO, POR CUALQUIER MEDIO CONVENCIONAL O ELECTRÓNICO, PARA FINES DE ESTUDIO E INVESTIGACIÓN, DESDE QUE SE CITE LA FUENTE.

Ficha catalográfica preparada por la Sección de Atendimento al Usuario del Servicio de la Biblioteca
"Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes" de la EESC/USP

B734d Borja Robertti, Juan Fernando
Directrices para el aprovechamiento energético de la
madera de residuos de actividades forestales y de poda
urbana, en Paraguay / Juan Fernando Borja Robertti;
orientador Valdir Schalch. -- São Carlos, SP, 2019.

Monografía (Especialización en Impactos Ambientales en
Obras de Infraestructura) -- Escuela de Ingeniería de São
Carlos de la Universidad de São Paulo.

1. Residuos sólidos. 2. Gestión de residuos.
3. Dendroenergía. 4. Aprovechamiento energético.
5. Tecnologías de aprovechamiento. I. Schalch, Valdir.
II. Título.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato:	Juan Fernando Borja Robertti
Título do TCC:	Directrices para el aprovechamiento energético de la madera de residuos de actividades forestales y de poda urbana, en Paraguay.
Data da defesa:	05/12/2019

Comissão Julgadora	Resultado
Prof. Dr. Valdir Schalch	Aprovado
Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Hidráulica e Saneamento	
Banca: Me. Túlio Queijo de Lima	Aprovado
Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Hidráulica e Saneamento	

Presidente da Banca: **Prof. Dr. Valdir Schalch**

Assinatura

DEDICATORIA

*A mi familia, por el cariño,
acompañamiento y apoyo constante.*

AGRADECIMENTOS

Al Prof. Senior Valdir Schalch, por las enseñanzas y los conocimientos compartidos durante el todo curso.

Al Prof. Tulio Queijo de Lima por las orientaciones y tiempo dedicado en la materia desarrollada, así como para la concreción del presente trabajo.

A los compañeros de curso que brindaron su acompañamiento, colaboración y aporte durante el desarrollo del curso y la elaboración de la investigación.

A los Ing. Carlos Zaldívar y Gustavo Casal, y en nombre de ellos, a los compañeros del Viceministerio de Minas y Energías, por el apoyo para la formar parte del curso, a más de los aportes técnicos brindados.

Al Ing. Hugo Miranda y en su nombre, a las demás autoridades del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, por encabezar y liderar este proceso de formación y crecimiento profesional, a través del curso de especialización en una prestigiosa y renombrada institución.

“La verdadera sabiduría está en reconocer la propia ignorancia”.

Sócrates (470-399 a.C.).

“Cualquier momento es perfecto para aprender algo nuevo”.

Albert Einstein (1879-1955).

RESUMEN

Borja Robertti, J.F. **Directrices para el aprovechamiento energético de la madera de residuos de actividades forestales y de poda urbana, en Paraguay**. 2019. 88 f. Monografía (Trabajo de Conclusión de Curso) – Escuela de Ingeniería de São Carlos, Universidad de São Paulo, São Carlos, 2019.

El Paraguay, con una población creciente, tiene una progresiva producción de residuos sólidos, como también la demanda por energía en diversos sectores de la sociedad. La gestión de los residuos sólidos en el país es aún incipiente, con vacíos organizacionales, normativos, financieros y técnicos. La matriz de explotación energética en el país está compuesta esencialmente por la energía derivada del aprovechamiento del potencial hidroeléctrico de los principales ríos, de la quema de biomasa y de los derivados de petróleo (importado); por su parte, las fuentes de energías alternativas como fotovoltaicas, eólicas y biocombustibles, son escasamente explotadas hasta la actualidad. La mayor parte de la energía hidroeléctrica es comercializada a países vecinos, por ello, la energía proveniente de la incineración de la biomasa, representa aún la fuente primordial tanto para los usos domésticos como industriales, y con perspectivas de que este panorama se mantenga aún por varios años. Las fuentes principales de dendroenergía, fueron históricamente los recursos forestales (leña y carbón), extraídos de bosques nativos, que junto a otros factores, contribuyó a las altas tasas de deforestación en el territorio nacional. El aprovechamiento energético de la madera de residuos de actividades forestales y de poda urbana, podría representar una alternativa válida para la gestión de residuos sólidos como para la producción de energía, con beneficios ambientales, económicos y sociales. En la presente investigación se busca describir las tecnologías para aprovechamiento energético de la madera de estos residuos, caracterizar como se presenta el gerenciamiento de los residuos sólidos en Paraguay, y con eso recomendar tecnologías apropiadas para el contexto del país, es decir, en general se pretende elaborar directrices aplicables en favor de dicho aprovechamiento. Se observaron las principales normativas referentes a la política nacional de residuos sólidos, a la gestión y los datos de generación. Las alternativas tecnológicas evaluadas fueron la combustión directa, pelletización, pirólisis y gasificación, y posteriormente comparadas. Entre los resultados, se presenta un cuadro de principales normas establecidas, además de un análisis descriptivo de dichas reglamentaciones aplicadas en Paraguay, con los puntos más destacables. En referencia a las tecnologías estudiadas, se muestran cuáles son más recomendables atendiendo factores específicos como potencia generada, potencial de calentamiento global, costo de inversión y operación, impacto ambiental por potencia generada y costo de operación para dicha potencia. Se presentan conclusiones y recomendaciones ajustadas a los análisis realizados, entre los cuales se pueden mencionar que existen normativas legales que indican como debe ser la gestión de los residuos sólidos, pero faltan normativas legales y técnicas específicas para el manejo y aprovechamiento energético de los residuos de madera. Se debería estimular la adopción de la tecnología de pelletización, atendiendo que se emplea la combustión directa de leñas de madera sólida en hornos con bajos rendimientos energéticos, los cuales podrían ser sustituidos o adaptados para el empleo de la combustión de pellets.

Palabras claves: Residuos sólidos. Gestión de residuos. Dendroenergía. Aprovechamiento energético. Tecnologías de aprovechamiento.

ABSTRACT

Borja Robertti, J.F. **Guidelines for the energy use of waste wood from forestry and urban pruning activities in Paraguay**. 2019. 88 f. Monograph (Course Completion Work) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

Paraguay, with a growing population, has a progressive production of solid waste, as well as the demand for energy in various sectors of society. The management of solid waste in the country is still incipient, with organizational, regulatory, financial and technical gaps. The energy exploitation matrix in the country is essentially composed of the energy derived from the exploitation of the hydroelectric potential of the main rivers, the burning of biomass and petroleum derivatives (imported); on the other hand, alternative energy sources such as photovoltaic, wind and biofuels are scarcely exploited until today. Most of the hydroelectric power is commercialized to neighboring countries, therefore, the energy from the incineration of biomass, still represents the primary source for both domestic and industrial uses, and with prospects that this scenario is still maintained by several years. The main sources of dendroenergy, historically, were forest resources (firewood and coal), extracted from native forests, which, together with other factors, contributed to the high rates of deforestation in the national territory. The energy use of wood from waste from forestry and urban pruning activities could represent a valid alternative for solid waste management as well as for energy production, with environmental, economic and social benefits. This research seeks to describe technologies for the energy use of wood from these wastes, characterize how solid waste management is presented in Paraguay, and thereby recommend appropriate technologies for the country's context, that is, in general intends to develop applicable guidelines in favor of such use. The main regulations regarding the national solid waste policy, management and generation data were observed. The technological alternatives evaluated were direct combustion, pelletization, pyrolysis and gasification, and subsequently compared. Among the results, a table of main established norms is presented, in addition to a descriptive analysis of said regulations applied in Paraguay, with the most outstanding points. In reference to the technologies studied, they are shown which are more recommended considering specific factors such as generated power, global warming potential, investment and operation cost, environmental impact by generated power and operating cost for said power. Conclusions and recommendations are presented adjusted to the analyzes carried out, among which we can mention that there are legal regulations that indicate how solid waste management should be, but there are no legal regulations and specific techniques for the management and energy use of waste from wood. The adoption of pelletization technology should be encouraged, taking into account that direct combustion of solid wood firewood is used in furnaces with low energy yields, which could be substituted or adapted for the use of pellet combustion.

Keyword: Solid waste. Waste management. Dendroenergy. Energy use. Harnessing technologies.

RESUMO

Borja Robertti, J.F. **Diretrizes para o uso energético da madeira de resíduos de atividades florestais e de poda urbana no Paraguai**. 2019. 88 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

O Paraguai, com uma população crescente, tem uma produção progressiva de resíduos sólidos, bem como a demanda por energia em vários setores da sociedade. O gerenciamento de resíduos sólidos no país ainda é incipiente, com lacunas organizacionais, regulatórias, financeiras e técnicas. A matriz de exploração energética no país é composta essencialmente pela energia derivada da exploração do potencial hidrelétrico dos principais rios, da queima de biomassa e os derivados de petróleo (importados); por outro lado, fontes alternativas de energia, como energia fotovoltaica, eólica e biocombustíveis, são pouco exploradas até hoje. A maior parte da energia hidrelétrica é comercializada para países vizinhos; portanto, a energia proveniente da incineração de biomassa ainda representa a fonte primordial tanto para usos domésticos como industriais, e com perspectivas de que esse cenário ainda seja mantido vários anos. As principais fontes de dendroenergia, historicamente, foram os recursos florestais (lenha e carvão), extraídos de florestas nativas, que, juntamente com outros fatores, contribuíram para as altas taxas de desmatamento no território nacional. O aproveitamento energético da madeira de resíduos de atividades florestais e de poda urbana, poderia representar uma alternativa válida para a gestão de resíduos sólidos e para a produção de energia, com benefícios ambientais, econômicos e sociais. Na presente pesquisa busca-se descrever as tecnologias para o aproveitamento energético da madeira a partir desses resíduos, caracterizar como se apresenta o gerenciamento de resíduos sólidos no Paraguai e, assim, recomendar tecnologias apropriadas para o contexto do país, ou seja, em geral pretende elaborar diretrizes aplicáveis em favor de tal aproveitamento. Foram observadas as principais normativas referentes à política nacional de resíduos sólidos, a gestão e aos dados de geração. As alternativas tecnológicas avaliadas foram combustão direta, peletização, pirólise e gaseificação, e posteriormente comparadas. Entre os resultados, é apresentado um quadro das principais normas estabelecidas, além de uma análise descritiva dos referidos regulamentos aplicados no Paraguai, com os pontos mais destacados. Em referência às tecnologias estudadas, são mostradas quais são mais recomendadas considerando fatores específicos, como potência gerada, potencial de aquecimento global, custo de investimento e operação, impacto ambiental por potência gerada e custo operacional para a referida potência. São apresentadas conclusões e recomendações ajustadas às análises realizadas, dentre as quais podemos mencionar que existem regulamentos legais que indicam como deve ser o gerenciamento de resíduos sólidos, mas faltam regulamentos legais e técnicos específicos para o gerenciamento e aproveitamento energético de resíduos de madeira. Deve ser incentivada a adoção da tecnologia de peletização, atendendo que é empregada a combustão direta de lenha de madeira sólida em fornos com baixo rendimento energético, que poderiam ser substituídos ou adaptados ao uso da combustão de pellets.

Palavras-chave: Resíduos sólidos. Gestão de resíduos. Dendroenergia. Aproveitamento energético. Tecnologias de aproveitamento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Jerarquía estratégica de gestión integrada de residuos sólidos, a partir de PNRS.	24
Figura 2. Caracterización y clasificación de residuos.....	27
Figura 3. Tipos de residuos de madera y su origen.	34
Figura 4. Estructura del consumo final de productos de la biomasa, año 2017.	38
Figura 5. Estimación de incremento poblacional, consumo de leña y evolución de la superficie forestal.	39
Figura 6. División política del Paraguay.	40
Figura 7. Formas de energía producida a partir de la biomasa.	45
Figura 8. Alternativas tecnológicas para el uso de residuos de madera.	45
Figura 9. Combustión en lecho fluido (CLF) estacionario.....	47
Figura 10. Sistema simplificado de combustión de biomasa.	48
Figura 11. Pellets y briquetas elaborados a partir de residuos de madera.....	49
Figura 12. Estufa de pellets con generador termoeléctrico (micro cogeneración).	49
Figura 13. Caldera de pellets de alto rendimiento.	50
Figura 14. Principales productos de la pirólisis.	50
Figura 15. Pirólisis en lecho fluidizado.....	52
Figura 16. Pirolizador de cilindro (artesanal) y pirolizador de flujo continuo (industrial).	52
Figura 17. Gasificador con cogeneración (electricidad y calor) a partir de biomasa.	54
Figura 18. Gasificador y sistemas de tratamiento de syngas.....	54
Figura 19. Comparación impacto ambiental y potencia generada por cada alternativa.	64
Figura 20. Comparación costos de operación y potencia generada por cada alternativa.	65
Figura 21. Potencia generada con cada tecnología.	80
Figura 22. Resumen de potencia generada y consumida por cada alternativa.	80
Figura 23. Análisis del PCG de las tecnologías.....	81
Figura 24. Costos de inversión total y de equipos para cada tecnología.....	81
Figura 25. Costos de operación mensual para cada tecnología.	82
Figura 26. Energía originada del aprovechamiento de la biomasa.	84
Figura 27. Central termoeléctrica de biomasa.	84
Figura 28. Calderas de generación de energía para plantas termoeléctricas.	85
Figura 29. Unidad de generación eléctrica GEK 20 kWe (potencia real), a partir de astillas de madera.	85

Figura 30. Generador de gases calientes: cámara de combustión junto con una cámara de dilución.	86
Figura 31. Gasificador de biomasa con unidad de generación eléctrica acoplada.	86
Figura 32. Modelo de gasificador de biomasa con unidad generadora de electricidad incorporada.....	87
Figura 33. Planta de generación de electricidad con gasificación integrada de biomasa.	87
Figura 34. Incinerador de pellets de madera.	88
Figura 35. Prototipo de estufa de pellets con tecnología de micro cogeneración.	88

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de los residuos sólidos según Ley n° 12.305/2010.....	26
Cuadro 2. Clasificación de los residuos sólidos según norma ABNT NBR n° 10.000/2014...	26
Cuadro 3. Clasificación de los residuos sólidos según Ley n° 3.956/2010.....	28
Cuadro 4. Participación de los materiales en el total de RSU colectados en Brasil en 2012...	33
Cuadro 5. Cantidad estimada de residuos de madera generados en Brasil.	35
Cuadro 6. Aplicaciones de los residuos forestales.....	36
Cuadro 7. Aspectos característicos de tecnología combustión directa y combustión directa con cogeneración.....	47
Cuadro 8. Aspectos característicos de tecnología de producción de pellets.	49
Cuadro 9. Aspectos característicos de tecnología pirólisis	51
Cuadro 10. Aspectos característicos de tecnología gasificación.	53
Cuadro 11. Compendio de clasificación de residuos sólidos según normativas de Brasil y Paraguay.....	57
Cuadro 12. Resumen de principales normativas referentes a la gestión de residuos sólidos...	59
Cuadro 13. Potencia generada con cada tecnología.....	60
Cuadro 14. Resumen de potencia generada y consumida por cada alternativa.	61
Cuadro 15. Análisis del PCG de las tecnologías.	61
Cuadro 16. Costos de inversión total y de equipos para cada tecnología.	62
Cuadro 17. Costos de operación mensual para cada tecnología.....	63
Cuadro 18. Análisis comparativo de impacto ambiental y costos de operación en relación a potencia generada.....	64
Cuadro 19. Tecnología recomendada según análisis comparativo.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas – Asociación Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	–	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – Asociación Brasileira de Empresas de Limpieza Pública y Residuos Especiales
ACV	–	Análisis del Ciclo de Vida
ANDE	–	Administración Nacional de Electricidad
BID	–	Banco Interamericano de Desarrollo
DGEEC	–	Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos
DPE	–	Departamento de Planificación y Estadística DRE
DRE	–	Dirección de Recursos Energéticos
EPH	–	Encuesta Permanente de Hogares
FAO	–	Food and Agriculture Organization – Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEK	–	Gasifier Experimenters Kit - Kits de Experimentos de Gasificadores
GIZ	–	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit – Cooperación Alemana al Desarrollo.
IBAMA	–	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – Instituto Brasileiro de Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables
INFONA	–	Instituto Forestal Nacional
IPCC	–	Intergovernmental Panel on Climate Change – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MADES	–	Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible
MAG	–	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MIC	–	Ministerio de Industria y Comercio
MOPC	–	Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones
NBR	–	Norma Brasileira – Norma Brasileira
OMS	–	Organización Mundial de la Salud

OPS	–	Organización Panamericana de la Salud
PNGRIS	–	Plan Nacional para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos
PNRS	–	Plan Nacional de Residuos Sólidos
RDF	–	Refuse Derived Fuel – Combustible Derivado de Residuos
REDIEX	–	Red de Inversiones y Exportaciones
RSU	–	Residuos Sólidos Urbanos
SEAM	–	Secretaría del Ambiente
STP	–	Secretaria Técnica de Planificación
URE	–	Usina de Recuperación Energética
VMME	–	Viceministerio de Minas y Energía.

LISTA DE SÍMBOLOS

H ₂ O	–	Agua
CO ₂	–	Dióxido de Carbono
CO ₂ eq	–	Dióxido de carbono equivalente o equivalente de dióxido de carbono
US\$	–	Dólares estadounidenses
US\$/kW	–	Dólares estadounidenses por kilowatt
US\$/kW/año	–	Dólares estadounidenses por kilowatt por año
US\$/kWh	–	Dólares estadounidenses por kilowatt-hora
US\$/kWh/año	–	Dólares estadounidenses por kilowatt-hora por año
US\$/mes	–	Dólares estadounidenses por mes
°C	–	Grados Celsius o centígrados
H ₂	–	Hidrogeno gaseoso o dihidrógeno
kg	–	Kilogramo
kgCO ₂ eq	–	Kilogramo de dióxido de carbono equivalente
kgCO ₂ eq/kW	–	Kilogramo de dióxido de carbono equivalente por kilowatt
kg/año	–	Kilogramo por año
kg/día	–	Kilogramo por día
kW	–	Kilowatt
kW/t/mes	–	Kilowatt por toneladas por mes
MJ/kg	–	Megajoule por kilogramo
MJ/m ³	–	Megajoule por metro cúbico
MW	–	Megawatt
CH ₄	–	Metano
m	–	Metro
m ³	–	Metro cúbico
mm	–	Milímetro
CO	–	Monóxido de Carbono
n°	–	Número
N ₂ O	–	Óxido nitroso
CLP	–	Peso chileno

%	–	Porcentaje
t	–	Toneladas
t/año	–	Toneladas por año
t/mes	–	Toneladas por mes

SUMARIO

1	INTRODUCCIÓN.....	19
2	OBJETIVOS	21
2.1	General.....	21
2.2	Específicos	21
3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	22
3.1	Residuos Sólidos	22
3.1.1	Definiciones establecidas en Brasil.....	22
3.1.2	Definiciones establecidas en Paraguay.....	23
3.2	Política Nacional de Residuos Sólidos	23
3.2.1	Política Nacional de Brasil.....	23
3.2.2	Política Nacional de Paraguay	24
3.3	Clasificación de los residuos sólidos	25
3.3.1	Clasificación en Brasil.....	25
3.3.2	Clasificación en Paraguay.....	28
3.4	Gestión de los residuos sólidos	29
3.5	Procedimientos de tratamiento y aprovechamiento energético de residuos	30
3.6	Normativas sobre recuperación energética de los residuos sólidos urbanos	31
3.6.1	Normativas de Brasil	31
3.6.2	Normativas de Paraguay.....	32
3.7	Generación de residuos sólidos urbanos.....	32
3.7.1	Datos de Brasil	33
3.7.2	Datos de Paraguay.....	33
3.8	Generación de residuos de madera.....	34
3.8.1	Residuos de poda urbana	35
3.8.2	Residuos de manejo y procesamiento forestal.....	36
3.9	La biomasa como fuente de energía	37
3.9.1	Aprovechamiento de la energía de biomasa en Paraguay	37
4	METODOLOGÍA	40
4.1	Área de estudio.....	40
4.1.1	Ubicación geográfica.....	40
4.1.2	Características generales del país.....	40

4.2	Tipo de estudio	42
4.3	Conceptualización y descripción de las normativas	42
4.3.1	Ley n° 12.305/2010. Que instituye la política nacional de residuos sólidos	43
4.3.2	Norma ABNT NBR 10.004/2004. Clasificación de residuos sólidos	43
4.3.3	Ley n° 3.956/2009. Gestión integral de los residuos sólidos	43
4.3.4	Decreto n° 7.391/2017. Por el cual se reglamenta la ley n° 3.956/2009	44
4.4	Principales alternativas tecnológicas para el aprovechamiento energético por medio de conversión termoquímica de residuos de madera	44
4.4.1	Combustión directa	46
4.4.2	Pelletización y/o briquetaje	48
4.4.3	Pirólisis	50
4.4.4	Gasificación	53
4.5	Análisis de ciclo de vida	55
4.6	Criterios para definición de alternativas tecnológicas aplicables en Paraguay	55
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
5.1	Análisis de normativas.....	57
5.2	Análisis de tecnologías de aprovechamiento energético	60
5.2.1	Comparación de potencia generada por distintas tecnologías	60
5.2.2	Análisis de ciclo de vida	61
5.2.3	Análisis económico: costo de inversión	62
5.2.4	Análisis económico: costo de operación.....	63
5.2.5	Análisis comparativo de impacto ambiental y costos en relación a potencia generada	63
5.2.6	Resumen de tecnologías recomendadas según análisis comparativo	65
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
6.1	Conclusiones y recomendaciones sobre gestión de residuos forestales en Paraguay ..	67
6.2	Conclusiones sobre alternativas de aprovechamiento energético	68
	REFERENCIAS	70
	APÉNDICES	79
	ANEXOS.....	83

1 INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas por lo general se encuentran asociadas a la utilización y aprovechamiento de recursos o bienes que se obtienen de la naturaleza directamente, o de la transformación de las mismas para los fines deseados. Esta explotación, en virtud a favorecer el atendimento de las necesidades o requerimientos para el bienestar de las personas, trae asociada la generación de residuos de diversos tipos y origen.

El tratamiento y manejo de estos residuos en general, representa en la actualidad un aspecto de gran influencia en la planificación de las instituciones para la administración de las áreas urbanas (especialmente) como de las rurales. De entre estos, los residuos sólidos pueden tener un tratamiento específico para darles una destinación adecuada, así otorgarle nuevamente un valor de utilidad, aportando favorablemente a la manutención de un ambiente saludable para los habitantes y la reducción de la presión sobre los recursos naturales para obtención de materias primas destinadas a diversos usos.

Un aspecto importante para el manejo de los residuos sólidos sería apuntar a la recuperación y aprovechamiento energético de los mismos, puesto que, a más de representar una opción de destinación adecuada, podría aportar a la disponibilidad de alternativas de generación dentro de la malla energética del país.

El origen de la madera de residuos principalmente proviene de actividades forestales como los raleos, las podas, el aprovechamiento final y de procesos de industrialización de la madera; de los residuos del uso de la madera en actividades comerciales, industriales y construcción civil. A más de estos, podrían tener origen en otras actividades en las que son empleados recursos madereros varios.

En el caso de la energía proveniente de la biomasa (dendroenergía), en el Paraguay históricamente estuvo basada en la extracción de recursos forestales del bosque nativo, sumando así negativamente (junto a la tala para explotación maderera, habilitación de áreas agrícolas y ganaderas, asentamientos nuevos, quemadas provocadas, etc.), a favor de la presión existente sobre estas formaciones naturales, dándose tasas de deforestación elevadas a lo largo de las últimas décadas y una reducción progresiva de la superficie de bosques nativos.

Según un informe realizado por el Programa Nacional Conjunto ONU REDD+ Paraguay, en el país se ha experimentado incrementos y disminuciones en su tasa de promedio anual en los últimos 15 años. La deforestación ha alcanzado una tasa promedio por año de 366.180,47 hectáreas. Según este mismo informe la región oriental en el periodo del 2000 al

2015, ha sufrido una tasa de deforestación por cambio de uso de 63.383,36 hectáreas mientras que en la región occidental abarcan 302.797,10 hectáreas (IP AGENCIA DE INFORMACIÓN PARAGUAYA, 2016).

Otro factor relacionado que se podría indicar, es que dentro de la matriz energética nacional, la fuente principal de utilización sigue siendo la proveniente de la biomasa de la madera, que se emplea tanto a nivel doméstico (especialmente para cocción de alimentos) como a nivel industrial (secaderos de granos, aceiteras, olerías, cerámicas, industrias lácteas, de bebidas, frigoríficos, entre otros), en forma de leña, carbón vegetal y chips, de ahí que la recuperación energética de la madera de los residuos sólidos generados en las distintas actividades forestales y en la poda urbana de especies leñosas, podría aportar favorablemente a la economía de la nación.

Dicha recuperación energética de los residuos sólidos, está condicionada a la comprobación de su viabilidad técnica, ambiental y financiera, además de la implementación de un programa de monitoreo de la emisión de gases tóxicos aprobado por el órgano ambiental competente, en concordancia a los términos establecidos en la legislación y normativas que se encuentren en vigor.

En Paraguay existen aún vacíos normativos, técnicos y financieros, para la gestión y manejo adecuado de los residuos sólidos, en especial, lo relacionado a los recursos destinados al tal efecto, a la falta de conocimientos técnicos específicos por parte de los gestores, al nivel de concientización ciudadana y la escasez de innovaciones tecnológicas aplicadas a dicho menester.

Desprendido de esto último, una de las necesidades iniciales, sería la realización de estudios e investigaciones para atender las demandas actuales de conocimientos técnicos que puedan aplicarse localmente, por lo que se plantea la realización del presente trabajo, basándose en conocimientos e investigaciones científicas previamente realizadas y en concordancia a las normativas existentes. Con esto se busca elaborar directrices para el aprovechamiento energético de la madera contenida en los tipos de residuos considerados.

Otro factor de para la realización de la presente investigación, representa que dentro Viceministerio de Minas y Energía (del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones), existe una Dirección de Energías Alternativas, que viene trabajando en la generación de una base de datos de la generación energética a partir de la biomasa de la madera, y con los resultados de este trabajo, se podrían aportar informaciones válidas para ir complementando dicha base de informaciones.

2 OBJETIVOS

2.1 General

Elaborar directrices para el aprovechamiento energético de la madera de los residuos de actividades forestales y de poda urbana.

2.2 Específicos

- Analizar comparativamente las principales normativas reglamentarias aplicadas al manejo de residuos sólidos.
- Describir las tecnologías para aprovechamiento energético de la madera de los residuos de actividades forestales y de poda urbana.
- Caracterizar el aprovechamiento energético de la madera en el Paraguay.
- Recomendar tecnologías apropiadas para el aprovechamiento energético de los residuos de la madera en Paraguay.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Residuos Sólidos

Los RSU (Residuos Sólidos Urbanos) son un tipo de residuo difícil de manejar pues son muy heterogéneos en su composición (materia orgánica, metal, papel, vidrio, madera, plástico y textil), que varía mucho según el lugar de producción, con el número de habitantes del municipio, el poder adquisitivo de la población, las condiciones climáticas, los hábitos y costumbres de la población, el nivel educativo y las fechas festivas, casi siempre hacen que su solución sea compleja (SILVA, 2016).

Según menciona Schalch, *et al.* (2019), en Brasil, las definiciones contenidas en la PNRS (Política Nacional de Residuos Sólidos) representan un avance en la política ambiental en cuanto a los residuos sólidos; esta evolución se debe a la padronización de definiciones e inserción de nuevos conceptos, pues antes de la PNRS, diversos autores definían y conceptuaban residuos sólidos a su manera, y las definiciones normativas divergían en cuanto a padronización, lo que muchas veces causaba dudas o divergencias de interpretación.

Para Philippi & Aguiar (2018), algunas definiciones se basan en la cuestión económica, o sea, de que el residuo es el material que no tiene más valor económico para su poseedor. De cualquier modo, los residuos constituyen, en todas las definiciones, subproductos de la actividad humana con características específicas, definidas generalmente por el proceso que los originó.

La Ley n° 12.305/2010 menciona también que los rechazos¹ son residuos sólidos que, después de agotadas todas las posibilidades de tratamiento y recuperación por procesos tecnológicos disponibles y económicamente viables, no presentan otra posibilidad que no sea la disposición final ambientalmente adecuada.

3.1.1 Definiciones establecidas en Brasil

Según la Ley n° 12.305/2010 residuo sólido:

“es material, sustancia, objeto o bien desechado como resultado de actividades humanas en sociedad, cuyo destino final se procede, se procede, se requiere proceder o se está obligado proceder, en estados sólido o semisólido, así como gases contenidos en recipientes y líquidos cuyas particularidades hacen que su liberación en el sistema

¹ La traducción más próxima encontrada de rejeitos, fue el término rechazos.

de alcantarillado público o cuerpos de agua sea impracticable, o requieran para ello soluciones técnica o económicamente inviables frente a la mejor tecnología disponible²”.

La Norma ABNT NBR 10.004/2004 menciona que son:

“residuos sólidos y semisólidos resultantes de actividades industriales, domésticas, hospitalarias, comerciales, agrícolas, de servicio y de barrido. En esta definición se incluyen los lodos de los sistemas de tratamiento de agua, los generados en los equipos e instalaciones de control de la contaminación, así como ciertos líquidos cuyas particularidades hacen imposible que se descarguen en el sistema público de alcantarillado o cuerpos de agua o exijan para ello soluciones inviables desde el punto de vista técnico y económico frente a la mejor tecnología disponible”.

3.1.2 Definiciones establecidas en Paraguay

Según el Decreto n° 7.391/2017 “Residuo sólido: es el material, producto o subproducto que sin ser considerado como peligroso, se descarte o deseche y que sea susceptible de ser aprovechado o requiera sujetarse a métodos de tratamiento o disposición final”.

“Residuos sólidos urbanos: los generados en cada habitación, unidad habitacional o similares que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques, y los provenientes de cualquier otra actividad que genere residuos sólidos con características domiciliarias y los resultantes de la limpieza de las vías públicas y áreas comunes, siempre que no estén considerados por la Ley y este Reglamento como residuos de manejo especial”.

3.2 Política Nacional de Residuos Sólidos

3.2.1 Política Nacional de Brasil

La Política Nacional de Residuos Sólidos, mencionada en la Ley n° 12.305/2010, reúne el conjunto de principios, objetivos, instrumentos, pautas, metas y acciones adoptadas por el Gobierno Federal de Brasil, solo o en cooperación con los Estados, Distrito Federal, Municipios o individuos, con miras a una gestión integrada y ambientalmente adecuada de estos.

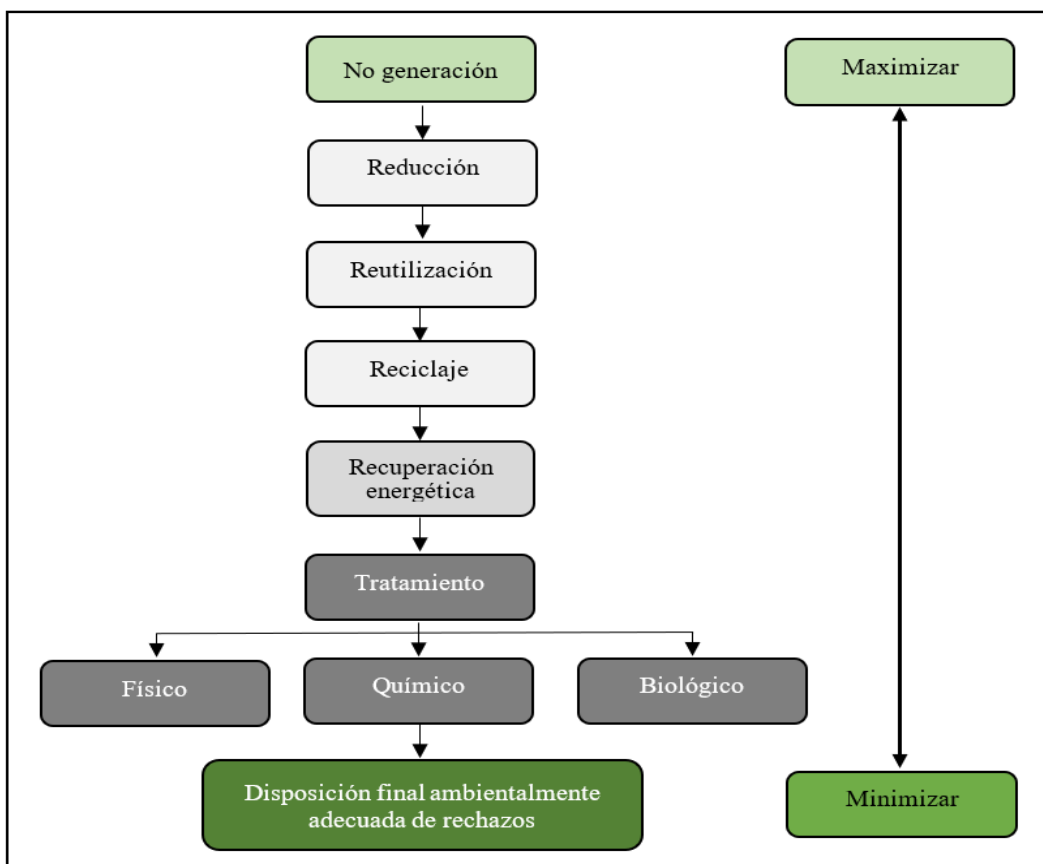
La misma forma parte de la Política Nacional de Medio Ambiente y a la vez se articula con la Política Nacional de Educación Ambiental, regulada por la Ley n° 9.795/1999, con la

² Esta definición también se menciona en la Instrucción Normativa IBAMA n° 13 (BRASIL, 2012).

Política Federal de Saneamiento Básico, regulada por Ley n° 11.445/2007 y Ley n° 11.107/2005.

Según la Ley 12.305/2010, en la gestión y gerenciamiento de residuos sólidos, se debe observar el siguiente orden de prioridad: no generación, reducción, reutilización, reciclaje, tratamiento de residuos sólidos y disposición final ambientalmente adecuada. Se menciona que pueden utilizarse tecnologías destinadas a la recuperación energética de los residuos sólidos urbanos, siempre que se haya sido comprobado su viabilidad técnica y ambiental, asociada a la implementación de un programa de monitoreo de emisiones de gases tóxicos aprobado por la agencia ambiental. En la Figura 1, se presenta la jerarquía estratégica de gestión integrada.

Figura 1. Jerarquía estratégica de gestión integrada de residuos sólidos, a partir de PNRS.



Fuente: adaptado Schalch *et al.*, 2019.

3.2.2 Política Nacional de Paraguay

La Ley n° 3.956/2009 tiene por objeto el establecimiento y aplicación de un régimen jurídico a la producción y gestión responsable de los residuos sólidos, cuyo contenido normativo y utilidad práctica deberá generar la reducción de los mismos, al mínimo, y evitar situaciones de riesgo para la salud humana y la calidad ambiental.

La gestión integral de los residuos sólidos deberá ser sanitaria y ambientalmente adecuada, con sujeción a los principios de prevención y control de impactos negativos sobre el ambiente y la salud humana (PARAGUAY, 2009).

Entre las principales atribuciones de la Autoridad de Aplicación de la dicha ley, que es el MADES (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, institución que anteriormente se denominaba SEAM – Secretaría del Ambiente), se establece que podrá formular las políticas nacionales en materia de gestión de residuos sólidos; examinar, dictaminar, aprobar o rechazar los proyectos de Gestión Integral de Residuos Sólidos, elaborado por otros niveles de gobierno nacional, departamental o municipal.

La política nacional en materia de residuos sólidos en Paraguay debe basarse en un conjunto de principios, postulados y estrategias que tengan como objetivos:

- Promover el mejoramiento de la calidad de vida de los ciudadanos a través del manejo adecuado de los residuos sólidos.
- Considerar el reciclaje de los residuos sólidos como estrategia de desarrollo en la medida que puede disminuir la dependencia de importación de materia prima.
- Garantizar el aprovechamiento racional de los recursos ambientales y proteger el patrimonio nacional.
- Fortalecer la capacidad de gestión de las entidades del gobierno central, departamental y municipal en materia de residuos sólidos.
- Fomentar la participación de la comunidad en la gestión del sector. Apuntando a esto, se adoptan una serie de principios rectores los cuales deberían constituir el marco referencial para la gestión de los residuos sólidos en el país; estos principios subyacentes al diseño de la política nacional ambiental, se enmarcan en los compromisos políticos asumidos en foros internacionales y brindan el marco referencial pertinente para orientar el desarrollo socioeconómico paraguayo, a largo plazo, hacia el bienestar humano por medio del uso y atención adecuados al ambiente (PARAGUAY, 2001).

3.3 Clasificación de los residuos sólidos

3.3.1 Clasificación en Brasil

El Artículo 13 de la Ley n° 12.305/2010 de Brasil, clasifica los residuos sólidos de la siguiente manera, como se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de los residuos sólidos según Ley n° 12.305/2010.

Criterio de clasificación	Clase de residuos
I- En cuanto a su origen	a) Residuos domésticos
	b) Residuos de limpieza urbana
	c) Residuos sólidos municipales
	d) Residuos de establecimientos comerciales y proveedores de servicios
	e) Residuos de servicios públicos de saneamiento
	f) Residuos industriales
	g) Residuos de servicios de salud
	h) Residuos de construcción
	i) Residuos agroforestales
	j) Residuos de los servicios de transporte
	k) Residuos mineros
II- Con respecto a la peligrosidad:	a) Residuos peligrosos
	b) Residuos no peligrosos

Fuente: elaboración del autor en base a la Ley 12.305/2010.

Según norma ABNT NBR 10.004/2004, la clasificación de los residuos sólidos implica identificar el proceso o la actividad que los originó, sus componentes y características, y comparar estos componentes con listas de residuos y sustancias cuyo impacto en la salud y el medio ambiente es conocido. Dicha clasificación de los residuos se muestra en el Cuadro 2.

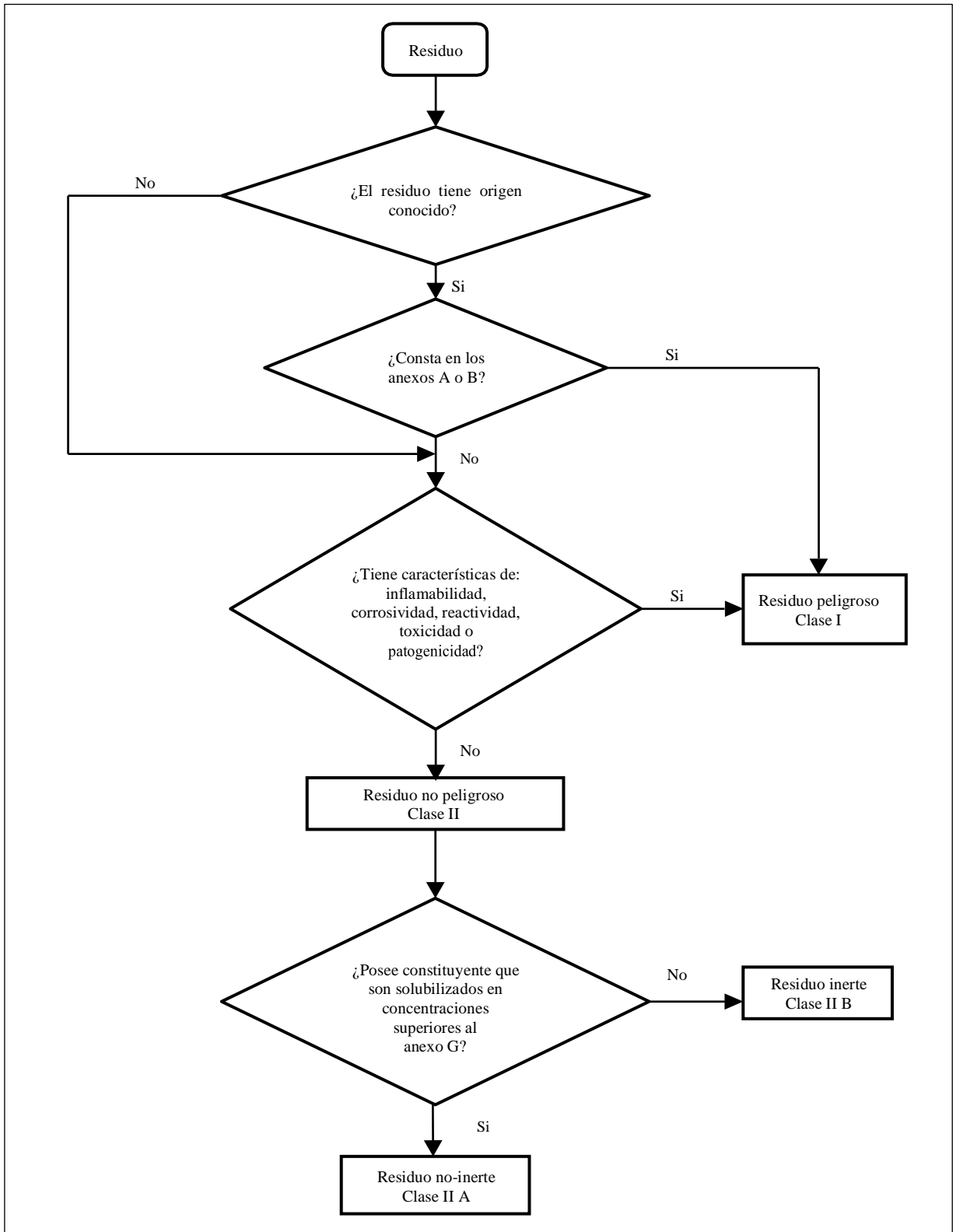
Cuadro 2. Clasificación de los residuos sólidos según norma ABNT NBR n° 10.000/2014.

Clase de residuos	Según características
Residuos de clase I: peligrosos	Inflamabilidad
	Corrosividad
	Reactividad
	Toxicidad
	Patogenicidad
Residuos de clase II: no peligrosos	Residuos de clase II A – No inerte
	Residuos de clase II B – Inerte

Fuente: elaboración del autor en base a la norma ABNT NBR 10.004/2004.

La caracterización y clasificación de residuos, adaptado de la norma ABNT NBR 10.004/2004, se presenta en la Figura 2, indicándose los caminos respectivos a seguir.

Figura 2. Caracterización y clasificación de residuos.



Fuente: adaptado de la norma ABNT NBR 10.004/2004.

3.3.2 Clasificación en Paraguay

En la Ley n° 3.956/2010, se indica que los residuos sólidos se clasificarán según su origen y composición, de acuerdo con los criterios técnicos establecidos en la presente Ley y su reglamentación.

Según el Decreto n° 7.391/2017, la Autoridad de Aplicación (MADES), agrupará y subclasificará los residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial en categorías, con el propósito de elaborar los inventarios correspondientes, y orientar la toma de decisiones basada en criterios de riesgo y en el manejo de los mismos. Para los efectos de esta Ley, los residuos se clasifican como se verifica en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificación de los residuos sólidos según Ley n° 3.956/2010.

Clase de residuos	División
I. Residuos sólidos urbanos	Conforme a la definición prevista en el Artículo 4 de la Ley.
II. Residuos de manejo especial considerados como no peligrosos	a) Los provenientes de servicios de salud.
	b) Residuos industriales.
	c) Los generados por las actividades agrícolas, pesqueras, forestales y pecuarias.
	d) Los de servicios de transporte.
	e) Residuos de la construcción civil.
	f) Residuos tecnológicos provenientes de las industrias de informática.
	g) Los lodos deshidratados o aquellos lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.
	h) Los neumáticos usados, muebles, enseres domésticos usados en gran volumen, plásticos y otros materiales de lenta degradación.
	i) Los de laboratorios industriales, químicos, biológicos, de producción o de investigación.
	j) Residuos de minería e hidrocarburos.
	k) Los demás que sean determinados por Decreto del Poder Ejecutivo o por la Autoridad de Aplicación de común acuerdo con las gobernaciones y las municipalidades.
III. Residuos peligrosos	Previstos en la Ley n° 567/95 y su reglamentación.

Fuente: elaboración del autor en base al Decreto 7.391/2017.

3.4 Gestión de los residuos sólidos

El concepto de gestión de residuos sólidos abarca actividades relacionadas con la toma de decisiones estratégicas y la organización del sector para este propósito, involucrando instituciones, políticas, instrumentos y medios (GRIPP, 2004).

Los residuos sólidos, cuyas características lo permitan, deberán ser aprovechados mediante su utilización o reincorporación al proceso productivo como materia secundaria, sin que represente riesgos a la salud y al ambiente. Son considerados como sistemas de aprovechamiento, el reciclaje, la recuperación, la reducción, el compostaje, la lombricultura y otros que la tecnología desarrolle y tenga autorización de las autoridades competentes. En cuanto al tratamiento o procesamiento de los residuos sólidos, tendrá como objetivo la reducción del volumen y la eliminación o disminución de los impactos dañinos.

La gestión integral de residuos sólidos más eficiente y sostenible en términos ambientales como señala Abbate (2011), es aquella que permita que llegue al destino final (vertedero o relleno sanitario) sólo una ínfima parte de los mismos (no más del 20% de los residuos totales), lo cual significaría el reciclaje no solo de los materiales tradicionales (vidrio, cartón, papel, metal, plásticos) sino también el reciclaje de la materia orgánica.

Leite (1997), menciona lo siguiente:

“la gestión de residuos sólidos se refiere a los aspectos tecnológicos y operativos de cuestión gerencial, económico, ambiental y de desempeño: productividad y calidad, por ejemplo, y se relaciona con la prevención, reducción, segregación, reutilización, acondicionamiento, recolección, transporte, tratamiento, recuperación de energía y disposición final de residuos sólidos.

Santos (2015) menciona que uno de los principales problemas ambientales es la eliminación inadecuada de los residuos sólidos, especialmente en los países en desarrollo, por lo que se deben buscar alternativas para mejorar la gestión, aumentar la eficiencia y reducir los costos, así como colaborar para preservar el medio ambiente.

La Ley n° 11.445/2007, señala que la limpieza urbana y gestión de residuos sólidos, representan un conjunto de actividades, infraestructuras e instalaciones operativas para la recolección, el transporte, el transbordo, el tratamiento y el destino final de los residuos domésticos y los residuos procedentes del barrido y limpieza de lugares públicos y carreteras (BRASIL, 2007).

3.5 Procedimientos de tratamiento y aprovechamiento energético de residuos

La dendroenergía es la principal fuente de energía para más de dos mil millones de personas, especialmente en los hogares de los países en desarrollo. Los biocombustibles, en particular la leña y el carbón vegetal, actualmente suministran más del 14% de la energía primaria total del planeta. Los escenarios sociales y económicos señalan un crecimiento continuo de la demanda de dendrocombustibles, que proseguirá aún por varios decenios (FAO 2009 *apud* AYALA, 2011).

Para Souto & Povinelli (2019), existen algunas técnicas que posibilitan la estabilización y reducción de los residuos para aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios, algunas de las cuales permiten el aprovechamiento de los residuos para la generación de energía. Otras técnicas tienen como objetivos el reaprovechamiento de los residuos en algunos procesos productivos, las cuales son consideradas parte de las cadenas de reciclaje.

Para la elección de la alternativa de tratamiento a ser adoptada, se deben atender aspectos importantes como:

- Costo de implantación y operación
- Disponibilidad financiera de los agentes envueltos
- Capacidad de atender las exigencias legales
- Cantidad y capacitación técnica de los recursos humanos.

El reaprovechamiento energético puede ser directo o indirecto. En el directo, los residuos son usados directamente como fuente de energía, pudiendo pasar por algunos procesos simples de tratamiento como fragmentación o molienda. En el indirecto, los residuos son convertidos por vía química o biológica en otros materiales, los cuales son empleados como fuente de energía (SOUTO & POVINELLI, 2019).

Las diversas tecnologías que buscan la estabilización de los residuos pueden ser separadas en procesos biológicos y físico-mecánicos. Entre los biológicos se citan el compostaje, la vermicompostaje y la digestión anaerobia. Para los físico-mecánicos, se pueden mencionar principalmente la combustión, la pelletización, la pirólisis y la gasificación.

Para Cardozo (2019), los residuos con suficiente poder calorífico pueden ser usados como combustible. Para eso, deben ser segregados de los demás, a través de un pretratamiento para homogeneizar el residuo, constituyéndose en una mezcla que, en inglés, recibe el nombre de RDF (Refuse Derived Fuel – Combustible Derivado de Residuos); solo posterior a dicho procedimiento, ingresa a una cámara de incineración, produciendo mejores condiciones para la generación de vapor, que tiende a compensar los costos operativos más altos.

El potencial energético de la biomasa es enorme en todo el mundo; los biocombustibles podrían ser una de las soluciones para el suministro de electricidad en comunidades aisladas (ALMEIDA, 2016). En los países en desarrollo, sigue siendo el combustible más barato, tanto por tonelada como por unidad de energía, además, proporciona el uso de mano de obra no calificada, genera empleo y contribuye al asentamiento del hombre en el campo; se puede almacenar en espacio libre y abierto, contiene poca ceniza y muy poco azufre (CORTEZ, 2011).

3.6 Normativas sobre recuperación energética de los residuos sólidos urbanos

3.6.1 Normativas de Brasil

La Portaria Interministerial n° 274/2019, busca disciplinar la recuperación de energía de los residuos sólidos municipales. Esta Ordenanza Interministerial menciona que una:

“Usina de Recuperación Energética de residuos sólidos urbanos (URE), se trata de cualquier unidad dedicada al tratamiento térmico de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía térmica generada por la combustión, con miras a reducir el volumen y la peligrosidad, preferentemente asociada con la generación de energía térmica o eléctrica”.

Este proceso representa una de las formas de eliminación ambientalmente apropiadas que se pueden adoptar, y como se mencionó con anterioridad, está sujeta a la prueba de su viabilidad técnica, ambiental y económico-financiera y la implementación de un programa de monitoreo de emisiones de gases tóxicos.

Dentro del marco de las directrices de la disposición citada, señala que residuos pueden enviarse a la URE:

- Residuos de limpieza urbana de barrido, limpieza de calles y carreteras y otros servicios de limpieza urbana; y
- Residuos domésticos procedentes de actividades domésticas en residencias urbanas.

Ley n° 9.478/1997, que se ocupa de la política energética nacional, menciona entre los principios y objetivos, proteger el medio ambiente y promover la conservación de energía; identificar las soluciones más apropiadas para el suministro de electricidad en las diversas regiones del país; utilizar fuentes alternativas de energía, mediante el uso económico de los insumos disponibles y las tecnologías aplicables (BRASIL, 1997).

3.6.2 Normativas de Paraguay

El Decreto 7.391/17 define a la recuperación energética como empleo de un residuo sólido como fuente de energía alternativa aprovechando su poder calorífico, previo tratamiento físico, químico, biológico o térmico.

La recuperación y aprovechamiento de los residuos o materiales contenidos en los residuos sólidos tiene como propósitos fundamentales:

- Racionalizar el uso y consumo de las materias primas provenientes de los recursos naturales.
- Recuperar valores económicos y energéticos que hayan sido utilizados en los diferentes procesos productivos.
- Reducir la cantidad de residuos a disponer finalmente en forma segura y adecuada.
- Disminuir el impacto ambiental, tanto por demanda y uso de materias primas como por los procesos de disposición final y/o eliminación (PARAGUAY, 2017).

El Decreto n° 6.092/2016 que establece la Política Energética del Paraguay, menciona como visión estratégica atender las necesidades de energía de la población y de todos los sectores productivos, con criterios de calidad, responsabilidad socio-ambiental y eficiencia, constituyéndose la energía en factor de crecimiento económico, desarrollo industrial y de progreso social, en el marco de la integración regional.

Esta visión será alcanzada mediante el cumplimiento de objetivos estratégicos (superiores y específicos) establecidos para el sector energético nacional, en conjunto. Entre los objetivos superiores del subsector bioenergía y otras fuentes alternativas, figura el de fomentar el uso de bioenergía y otras fuentes alternativas de manera sustentable y con criterios de eficiencia, competitividad y calidad.

3.7 Generación de residuos sólidos urbanos

Vilar, Machado & Carvalho (2015), mencionan que los RSU son compuestos normalmente por materiales (residuos alimenticios, residuos de jardinería y barrido, y materiales que se pudren rápidamente), papeles, cartones, plásticos, maderas, metales, vidrios y otros materiales (escombros, espumas, cuero, gomas, cenizas, tejidos, aceites, grasas, residuos industriales no peligrosos, etc.).

3.7.1 Datos de Brasil

La ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) realiza levantamientos y estadísticas acerca de los residuos sólidos urbanos, donde se muestra que la composición gravimétrica de los mismos varía entre las ciudades, de acuerdo con los diversos factores, como son los hábitos de la población, nivel de escolaridad, actividad económica, clima entre otros aspectos. En el Cuadro 4 se presentan algunos datos cuantitativos.

Cuadro 4. Participación de los materiales en el total de RSU colectados en Brasil en 2012.

Material	Participación (%)	Cantidad (t/año)
Metales	2,9	1.640.294
Papel, cartón y tetrapak	13,1	7.409.603
Plástico	13,5	7.635.851
Vidrio	2,4	1.357.484
Materia orgánica	51,4	29.072.794
Otros	16,7	9.445.830
TOTAL	100,0	56.561.856

Fuente: citado por ABRELPE, 2012.

La generación total de residuos en Brasil aumentó un 1% en el período 2016 y 2017, alcanzando un total de 214.868 toneladas de RSU por día en el país (ABRELPE, 2017). Por su parte, entre 2017 y 2018, la generación de RSU aumentó en casi un 1% y alcanzó 216.629 toneladas por día. Como la población también creció en el período (0,40%), la generación per cápita tuvo un aumento ligeramente menor (0,39%), esto significa que en promedio, cada persona genera 380 kg/año de RSU, es decir, un poco más de 1 kg/día (ABRELPE, 2019).

De esta cantidad, se recolectó el 92% (72,7 millones). Por un lado, esto significa un aumento del 1,66% en comparación con 2017, es decir, la recolección aumentó a un ritmo ligeramente mayor que la generación. Por otro lado, muestra que 6,3 millones de toneladas de residuos no fueron recolectados de los sitios de generación (ABRELPE, 2019).

3.7.2 Datos de Paraguay

La tasa promedio de generación de RSU era de 1,04 kg/día por persona, variando entre 0,58 y 1,30 kg/día por persona. Se estimaba que para el año 2001, se haya generado alrededor

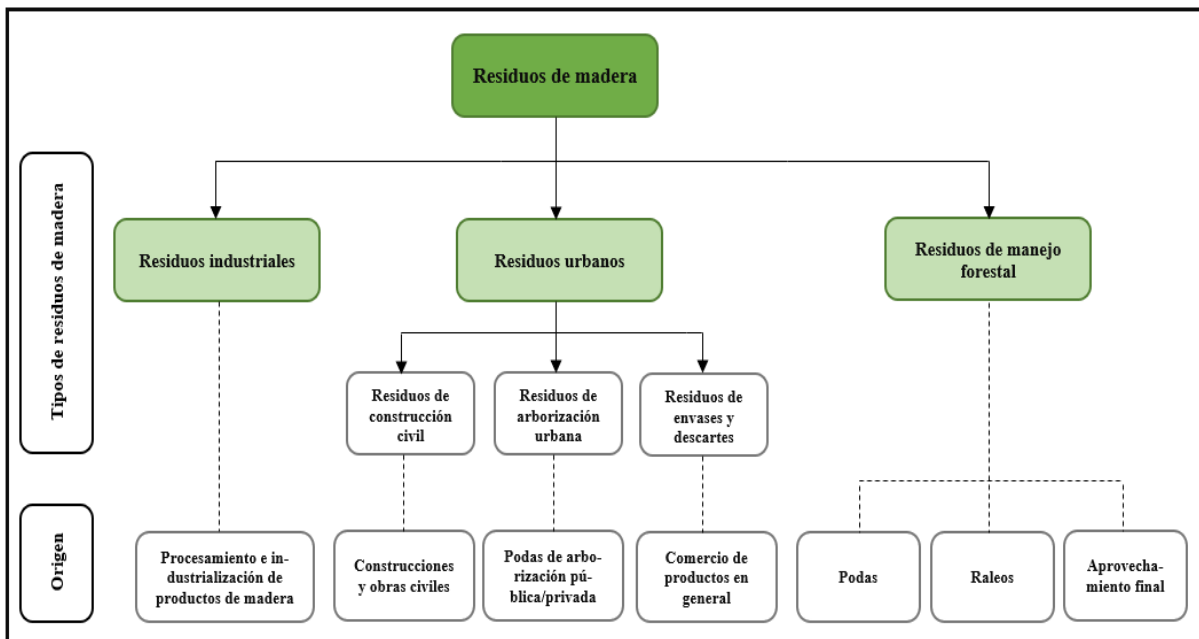
de 3.115 t/día en poblaciones urbanas, de las cuales sólo el 48% se recolectaba y casi nula disposición adecuada (PARAGUAY, 2001).

Según datos de Tavares, Lima & Merlo³ (2004 *apud* STP, 2018) la tasa promedio de generación de residuos sólidos urbanos en Paraguay pasó a alrededor de 1,20 kg/día por persona (2004), variando entre 0,50 y 1,50 kg/día por persona. Así, se estimó que se haya generado alrededor de 2.000 t/día en las poblaciones urbanas del departamento Central.

3.8 Generación de residuos de madera

Los residuos de la madera podrían originarse básicamente de los siguientes procesos: a) residuos industriales (provenientes de las actividades fabriles que implican el procesamiento e industrialización de productos de madera); b) los residuos urbanos, que podrían incluir los residuos derivados de la construcción civil (construcciones y obras civiles), residuos de arborización urbana (podas de arborización pública y privada) como también residuos de envases y descartes de madera (comercio de productos en general), y; c) los residuos generados en las actividades de manejo forestal, derivados de las podas, los raleos y el aprovechamiento final de un rodal. En la Figura 3, se presentan los tipos de residuos de madera y su origen.

Figura 3. Tipos de residuos de madera y su origen.



Fuente: adaptado de Wiechteck (2009).

³ TAVARES, S; LIMA, R. & MERLO, M. **Evaluación del Manejo de Residuos sólidos Municipales en Paraguay**. Asunción: OPS/OMS/STP, 2004.

Para tener idea del volumen de generación, se cita que según el Plan Nacional de Residuos Sólidos (BRASIL, 2011), para el sector forestal, la producción de residuos alcanzaba alrededor de 85,5 millones m³/año, considerando la cosecha y procesamiento mecánico, sin considerar la generación en la industria de transformación.

Escobar (2016), menciona los residuos de madera generados anualmente en Brasil corresponden a 30 millones de toneladas, lo que equivale a 11,5 millones de pies. La principal fuente de residuos es la industria maderera, que contribuye con el 90,7% de los residuos generados, seguida de los residuos de madera de construcción (3,0%) y finalmente los residuos urbanos (6,3%), como se muestran a continuación en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Cantidad estimada de residuos de madera generados en Brasil.

Sector	Residuos de madera 10 ³ t/año	%
Industria maderera	27.750	90,7
Construcción civil	923	3,0
Áreas urbanas	1.930	6,3

Fuente: Escobar (2016), basado en MMA (2009); (SAE, 2011).

3.8.1 Residuos de poda urbana

Según Schalch *et al* (2019), la poda consiste en el corte periódico de ramas de árboles y arbustos, abarcando también su remoción. Práctica inicialmente adoptada con el propósito de estimular la producción de flores y frutos, en el medio urbano puede tener las siguientes finalidades:

- Formación: orienta el crecimiento de la copa del árbol; retirada de ramas más bajas o con fricciones entre sí, favorece el libre tránsito de pedestres y vehículos, bien como la iluminación sobre la copa.
- Manutención: retirada de ramas y gajos damnificados, viejos o enfermos, para mejorar el aspecto estético y la salud del ejemplar.
- Despunte: busca simplemente reducir el tamaño del árbol; realizada de forma inapropiada, puede causar el surgimiento de una nueva copa, más frágil y que puede comprometer la estabilidad del árbol (CEMIG, 2011).

Las ciudades, grandes o pequeñas, poseen áreas verdes, plazas, parques, reservas forestales, céspedes, caminos boscosos, todo esto con propósito ya sea de ocio, paisaje, calidad de vida, etc. Estas áreas eventualmente crean una necesidad de poda regular, lo que da lugar a

residuos orgánicos verdes, mejor conocidos como residuos de poda y deshierbe, que deben ser eliminados adecuadamente (MAEDA, 2013). Según Cortez (2011) y Schalch *et al.* (2019), los residuos de poda de árboles, a pesar del alto tenor de lignina, son considerados fácilmente biodegradables y, por lo tanto, clasificables como residuos no peligrosos e inertes (Clase II B), y lo mismo ocurre con los residuos de deshierbe y también los de barrido.

3.8.2 Residuos de manejo y procesamiento forestal

Para De Almeida (2016), estos abarcan todo el material resultante de la explotación de la madera e incluyen los siguientes materiales: corteza, ramas, coronas, árboles con un diámetro inferior al mínimo comercial, árboles enfermos, árboles muertos, tocones y raíces. Por su parte Maeda (2013), enfatiza que en los residuos sólidos urbanos se encuentra un porcentaje significativo de residuos lignocelulósicos de utensilios de madera y envases. La utilización de residuos forestales puede realizar comúnmente como se cita en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Aplicaciones de los residuos forestales.

Forma de utilización	Tipo de materiales de forestales
Energía térmica	Puntas, tocones, restos, costaneras, cortezas, ramas y briquetas, utilizados en la quema para obtener calor en hornos (existe el problema de la emisión de contaminantes a la atmósfera).
Electricidad	Puntas, tocones, restos, costaneras, cortezas y ramas, así como briquetas, se utilizan en usinas termoeléctricas (existe el problema de la emisión de contaminantes a la atmósfera).
Carbón y combustibles	Puntas, tocones, restos, costaneras, cortezas y ramas utilizadas en procesos industriales para la producción de carbón, alcohol, metanol y gas combustible.
Extracción de aceites y resinas	Aserrín en general, utilizado para la extracción industrial de aceites y resinas para su uso como combustible, resinas plásticas, pegamentos y esencias.
Madera reconstituida	Aserrín en general, utilizada en la fabricación de láminas de madera reconstituida.
Cama de animales	Aserrín en general, preferiblemente blando, para contacto con animales.
Fertilizante	Aserrín en general y madera sólida picada. Se usa fresco o, después del compostaje, para proteger el suelo y como fertilizante, incluyendo la cama de gallinas usada y extraída.

Fuente: elaborado en base a VALE, SARMENTO & ALMEIDA, 2005.

Cuando el destino del aprovechamiento forestal es la extracción de combustible de madera, la cantidad de biomasa forestal retirada del bosque suele ser mayor, ya que las ramas de pequeño diámetro, los despuntes y la corteza pueden ser utilizados como combustible maderero o para la producción de briquetas, pellets o astillas (FAO, 2014).

3.9 La biomasa como fuente de energía

Silva (2016), menciona que el uso de la biomasa forestal como fuente de energía es una de las prácticas humanas más antiguas. Desde épocas remotas, la vegetación se ha constituido como una fuente de energía que se utilizaba en actividades domésticas y, más tarde, en actividades industriales y manufactureras.

El aprovechamiento de la biomasa forestal ha sido visto como una de las alternativas para la generación de energía, no solo por las ventajas económicas de usar estos residuos, generalmente sin valor de mercado y con altos costos de eliminación, así como las ventajas ambientales a partir de la no contaminación derivada de la deposición de residuos en el medio ambiente (DAL FARRA, 2004).

El uso de los residuos derivados del aprovechamiento forestal para producir energía, puede aumentar el acceso a dicha energía y/o suplantar el combustible de madera no sostenible o sustituir el uso de otros combustibles más costosos (FAO, 2014). En la investigación de Maeda (2013), se cita que en Brasil (en promedio), el 25,5% de la energía requerida para generar calor a partir de calderas y hornos industriales proviene de la biomasa (extracción de plantas de varios géneros, en forma de leña, que a veces se adquiere ilegalmente) y bagazo de caña de azúcar.

3.9.1 Aprovechamiento de la energía de biomasa en Paraguay

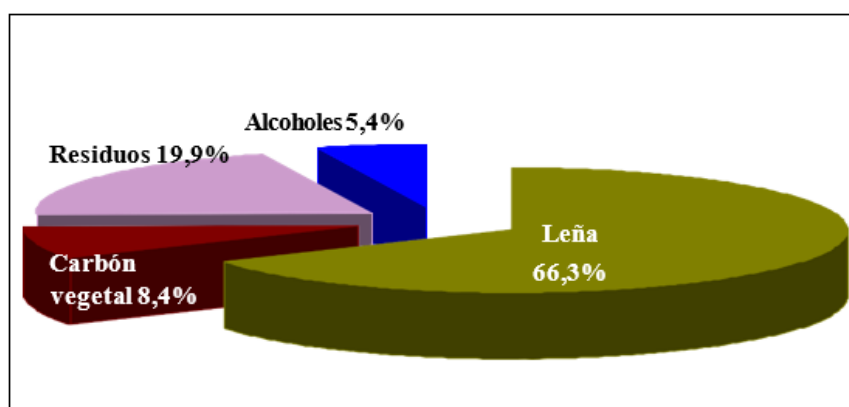
En la investigación de Ayala (2011), se menciona que según el BID (Banco Interamericano de Desarrollo), en Paraguay cerca del 70% de la extracción anual del bosque natural es utilizada como formas de combustión (especialmente como leña). La leña y, en menor cantidad, el carbón vegetal, son importantes fuentes de energía, mayormente en las áreas rurales, pero cada vez más cantidad de gente migra hacia áreas urbanas, en las cuales más de la mitad de la población vive actualmente, y donde también existe un gran mercado de leña y carbón vegetal.

La dendroenergía es la principal fuente de energía para más de la mitad de la población, especialmente en los hogares; así también, la biomasa alcanzaba casi el 87% de la demanda de energía de la industria paraguaya (BID, 2008). Según datos del VMME-MOPC; GIZ (2013a), la demanda de energía en Paraguay ha presentado un incremento considerable en los últimos años, y es muy probable que los precios de los recursos energéticos sigan en aumento. El aprovechamiento de los recursos renovables en Paraguay posee, sin dudas, múltiples y grandes beneficios no solo para la diversificación de la matriz energética paraguaya, sino también para parámetros económicos, sociales y ambientales.

De acuerdo a datos de la EPH (Encuesta Permanente de Hogares) 2017, la cantidad de hogares paraguayos que consumen leña como energético principal para la cocción de alimentos decreció a nivel nacional del 25,4% en el año 2016 al 25,2% en el año 2017 (en particular, alrededor del 84,7% del total de los hogares consumidores de leña corresponden al área rural). El consumo de leña del sector residencial tiene un peso en la estructura del consumo final de alrededor del 42% del total. En el del sector de la industria (incluyendo agropecuario y forestal) en el 2017 el consumo creció en un 1,6% respecto al registrado en el año 2016 (VMME-MOPC, 2018).

El consumo de carbón vegetal en el año 2017 creció en 6,2% respecto al año 2016. Alrededor del 90% de este consumo se registra en el sector residencial según los datos registrados en el Balance Nacional de Energía Útil del año 2013. De acuerdo a la EPH 2017, a nivel residencial el número de hogares que utilizan carbón vegetal como energético principal en la cocción de alimentos creció del 7,0% en el año 2016 al 7,6% en el año 2017 (VMME-MOPC, 2018). En la Figura 4, se muestra la estructura de consumo final de productos de la biomasa en el año 2017.

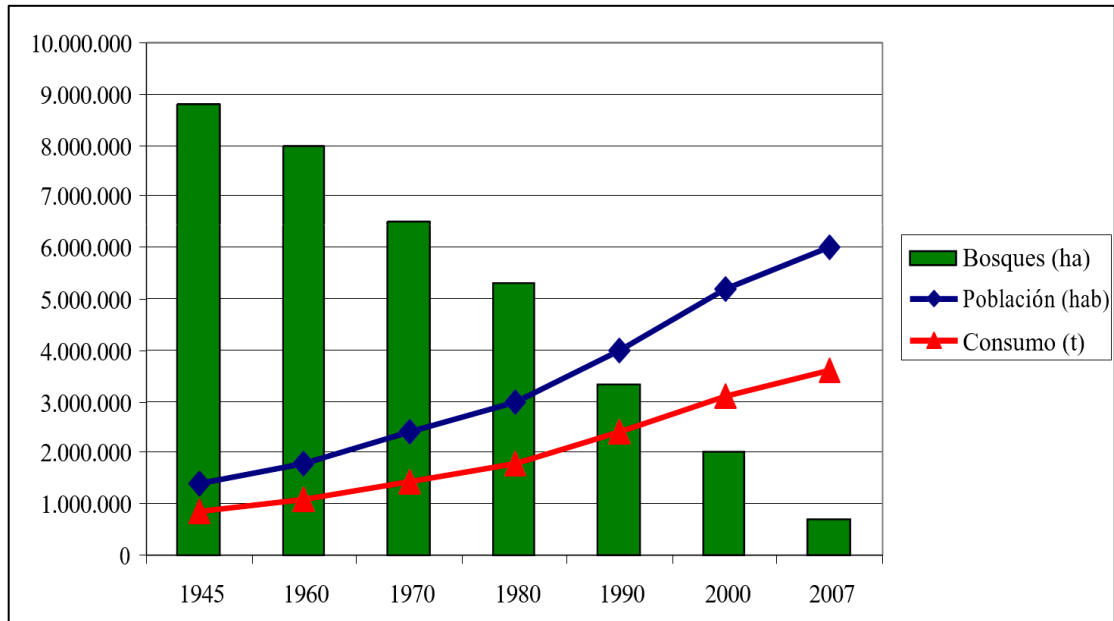
Figura 4. Estructura del consumo final de productos de la biomasa, año 2017.



Fuente: elaboración DPE-DRE en base al Balance Energético, citado por VMME-MOPC, 2018.

El país se encuentra en un estado de emergencia forestal por la falta de abastecimiento de biomasa sólida en todos los sectores. La oferta de madera de producción sustentable no es suficiente para cubrir la demanda actual; según el balance de biomasa, se registra un déficit anual de biomasa de entre 10 a 13 millones de toneladas (VMME–MOPC; GIZ, 2013b).

Figura 5. Estimación de incremento poblacional, consumo de leña y evolución de la superficie forestal.



Fuente: VMME; GIZ; UNIQUE WOOD, 2012.

Esta tendencia ya se venía experimentando en años anteriores, como se puede observar en la Figura 5, con el aumento del consumo, proporcional al aumento de la población, y una caída de la superficie boscosa nativa, ya que la extracción de materia prima (dendrocombustibles), se realizaba a partir de dichas formaciones naturales, sin criterios técnicos ni procesos afianzados para la recomposición de las mismas.

4 METODOLOGÍA

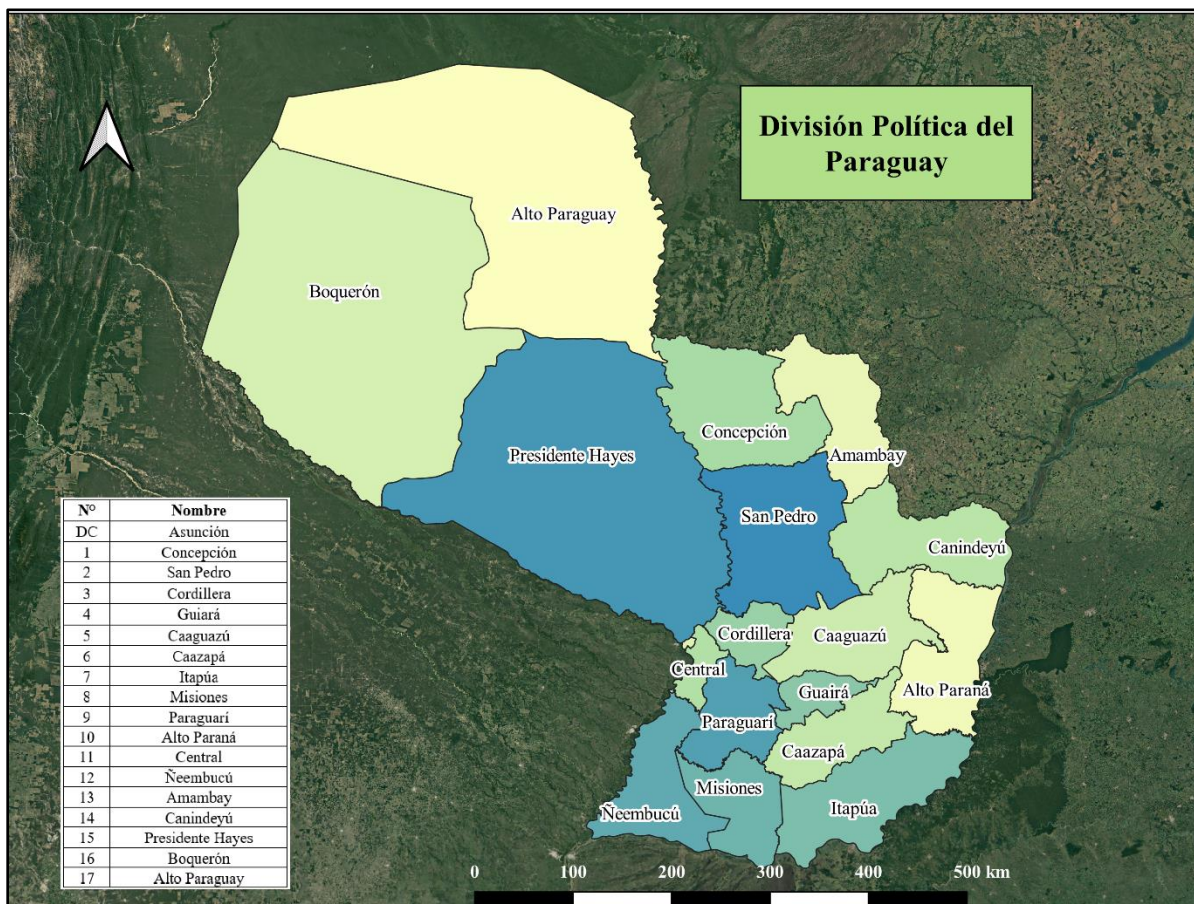
4.1 Área de estudio

4.1.1 Ubicación geográfica

La República del Paraguay, situada en el hemisferio sur del continente americano, está comprendida entre los paralelos 19° 18' y 27° 03' de latitud Sur, y entre los meridianos 54° 15' y 62° 38' Oeste de Greenwich. El trópico de Capricornio pasa casi exactamente sobre la parte media de su territorio. Sus límites son: Al norte, Brasil y Bolivia, al este, Brasil y Argentina, al sur, Argentina y al oeste Bolivia y Argentina.

4.1.2 Características generales del país

Figura 6. División política del Paraguay.



Fuente: elaboración del autor.

Como se puede apreciar en la Figura 6, el Paraguay se halla dividido políticamente en 17 departamentos, 14 en la Región Oriental y 3 en la Región Occidental (los departamentos se subdividen a su vez en distritos); la ciudad de Asunción es su capital. Las proyecciones de población (revisión 2015) estiman una población total de 6.461.041 personas para el año 2012, aumentando en poco más del doble de la población del año 1982. Los departamentos con mayor cantidad de habitantes son Central y Alto Paraná, que sumado a la población de Asunción concentran cerca de la mitad de la población del país. La población que habita en las ciudades supera a la del campo, con 59,2% en el área urbana y 40,8% en el área rural (PARAGUAY, 2016b).

El tipo de clima es tropical a subtropical, gobernado por masa de aire tropical y masa de aire polar, con veranos muy cálidos y lluviosos e inviernos con temperaturas bajas y menos lluviosas. La temperatura media anual es de 24°C y la máxima media anual es de 29°C. En la Región Oriental, la temperatura media anual oscila entre 22°C y 24°C, en la Región Occidental (o Chaco), la temperatura media anual es de 24°C (PARAGUAY, 2016c).

La variación espacial de la precipitación media anual es muy fuerte y la mayor parte de las precipitaciones del país son de tipo convectivo. Las isohietas tienen sentido meridional y varían desde un mínimo de 400 mm en el noroeste del Chaco a más de 1.700 mm en el este de la Región Oriental, cuatro veces más de un extremo del país al otro. Las precipitaciones también tienen una gran variación estacional, siendo mínimas en invierno, en los meses de julio y agosto y máximas en los meses que van de octubre a marzo, que suelen registrarse en forma de tormentas o chaparrones (FAO, 2015).

En referencia al empleo, en los últimos 30 años se ha observado una disminución de la población económicamente activa perteneciente al sector primario (actividades agropecuarias), pasando de representar el 42,9% en el año 1982 a representar el 21,4% en el año 2012, en cambio, la proporción de la población que pertenece al sector terciario (comercio y servicios) ha ido en aumento, pasando de 30,0% en el año 1982 a 57,4% en el año 2012 (PARAGUAY, 2016b).

En cuanto a vivienda y hogar, el Censo Nacional de Población y Viviendas 2012, revela que la cobertura de los servicios básicos de la vivienda aumentó considerablemente, principalmente el porcentaje de viviendas que cuentan con luz eléctrica con alrededor de 2,5 veces en el año 2012 con respecto al año 1982, alcanzando una cobertura del 96,4%. Igualmente las viviendas con baño con pozo ciego y/o red cloacal, prácticamente se ha triplicado, contando con este servicio 7 de cada 10 viviendas, en esta misma proporción las viviendas con servicio de agua corriente casi se ha cuadruplicado en relación a la cobertura presentada en el año 1982;

sin embargo, el servicio de recolección de basura, aunque prácticamente se ha triplicado en los últimos 40 años, su cobertura llega a 4 de cada 10 viviendas (PARAGUAY, 2016b).

4.2 Tipo de estudio

El estudio se desarrolló con alcance descriptivo. Sampieri, Collado & Lucio (2014), mencionan que este tipo de estudios buscan especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice, y con frecuencia, la meta del investigador consiste en describir fenómenos, situaciones, contextos y sucesos; esto es, detallar cómo son y se manifiestan. Con los estudios descriptivos se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis.

En la investigación se buscó describir las normativas principales referentes al manejo de los residuos sólidos tanto en Brasil como en Paraguay, de modo a establecer una idea básica comparativa de la situación de las reglamentaciones en ambos países y de esa manera, poder realizar sugerencias puntuales para el caso paraguayo.

Por su parte, se estudiaron algunas tecnologías aplicadas al aprovechamiento energético de los residuos de madera originados en las actividades forestales y en la poda urbana de árboles, como también la utilización energética que se da a la biomasa (especialmente en Paraguay), y en base a esto, generar recomendaciones técnicas para que dicha explotación del potencial energético contenido en este tipo de residuos, tenga un aporte significativo en la matriz energética proyectada a futuro en el país.

Para la evaluación y comparación de las tecnologías de aprovechamiento termoquímico de la madera, se tomaron en cuenta y analizaron datos generados en investigaciones científicas anteriores, adaptando los mismos a las necesidades de informaciones requeridas para el presente informe. Con esto se buscó generar conclusiones efectivas y establecer directrices para el aprovechamiento energético de la madera de los residuos de actividades forestales y de poda urbana en el Paraguay.

4.3 Conceptualización y descripción de las normativas

Fueron analizadas las normativas referenciales sobre gestión y manejo de residuos sólidos; en ellas se establecen las principales definiciones, la política nacional sobre los residuos

sólidos, la clasificación de los mismos y la recuperación energética, tanto para Paraguay como Brasil, enfatizando en los aspectos requeridos para el presente trabajo, citándose las siguientes:

4.3.1 Ley n° 12.305/2010. Que instituye la política nacional de residuos sólidos

Esta Ley establece la Política Nacional sobre Residuos Sólidos en el Brasil, proporcionando sus principios, objetivos e instrumentos, así como las directrices relacionadas con la gestión integrada de residuos sólidos, incluidas las peligrosas, las responsabilidades de los generadores y las autoridades públicas e instrumentos económicos aplicables.

En la misma se menciona que se pueden utilizar tecnologías destinadas a la recuperación de energía de los residuos sólidos urbanos, siempre que se haya comprobado su viabilidad técnica y ambiental, incluida la implementación de un programa de monitoreo de emisiones de gases tóxicos aprobado por la agencia ambiental. En el Artículo 13 de esta Ley, se presenta la clasificación de los residuos sólidos.

4.3.2 Norma ABNT NBR 10.004/2004. Clasificación de residuos sólidos

Un aspecto importante que se puede mencionar es que la segregación de residuos en la fuente generadora y la identificación de su origen son partes integrantes de los informes de clasificación, donde la descripción de las materias primas, de insumos y el proceso en el cual el residuo fue generado, deben ser explicados.

Esta norma brasilera establece los criterios de clasificación y los códigos para la identificación de residuos de acuerdo con sus características. Clasifica los residuos sólidos por sus riesgos potenciales para el medio ambiente y la salud pública, de modo que puedan gestionarse adecuadamente.

4.3.3 Ley n° 3.956/2009. Gestión integral de los residuos sólidos

La presente Ley del Paraguay se basa en los principios de: a) co-responsabilidad, b) congruencia, c) prevención, d) sustentabilidad, e) valor de mercado. Los residuos sólidos se clasificarán según su origen y composición, de acuerdo con los criterios técnicos establecidos.

La gestión integral de los residuos sólidos deberá ser sanitaria y ambientalmente adecuada, con sujeción a los principios de prevención y control de impactos negativos sobre el ambiente y la salud humana. Comprende, tanto los procesos como los agentes que intervienen en las etapas de generación, recolección, almacenamiento, transporte, transferencia, tratamiento

o procesamiento y aprovechamiento, hasta la disposición final; y cualquier otra operación que los involucre.

La Autoridad de Aplicación de la presente Ley es el MADES, con facultad para regular, examinar y resolver la aprobación o el rechazo del proyecto de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Por vía reglamentaria, dictará las normas complementarias necesarias para la adecuada gestión de los residuos sólidos.

4.3.4 Decreto n° 7.391/2017. Por el cual se reglamenta la ley n° 3.956/2009

Reglamenta la Ley n° 3.956/2009 y establece las condiciones para el manejo integral de los residuos sólidos, con la finalidad de prevenir riesgos sanitarios, proteger y promover la calidad ambiental, la salud y el bienestar de la persona humana.

Los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos tendrán tres niveles de competencias, conforme a su ámbito de aplicación o jurisdicciones territoriales: a) nacional (autoridad de aplicación – MADES); b) regionales (gobernaciones); c) locales (municipalidades).

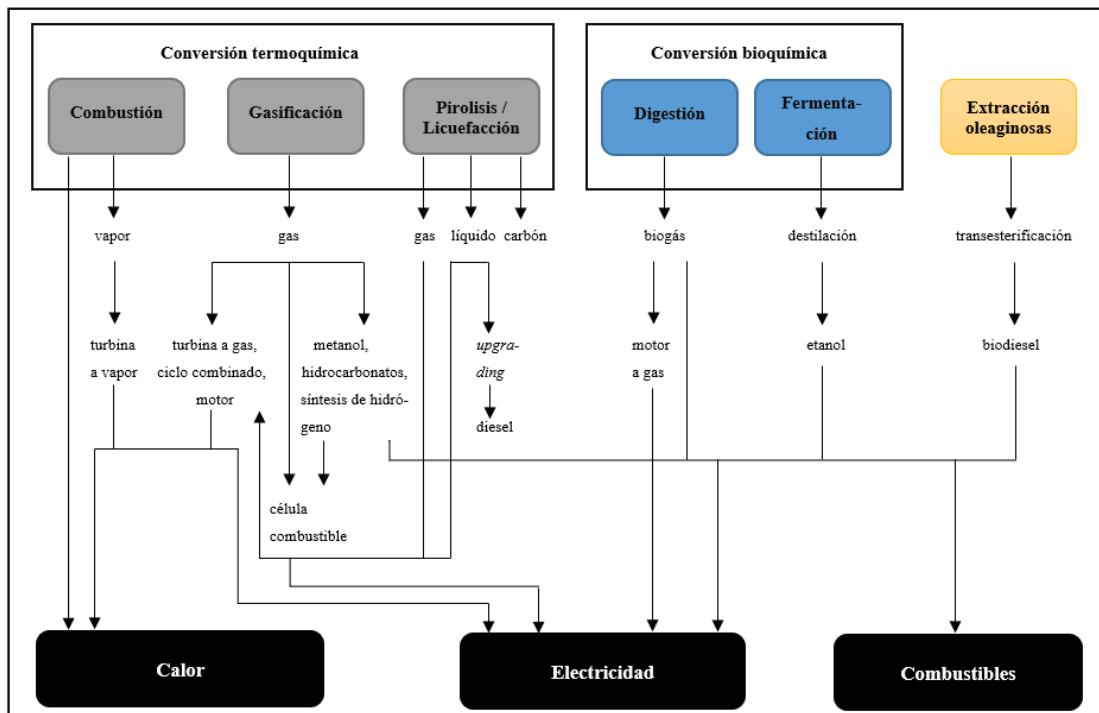
El PNGIRS (Plan Nacional para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos), será elaborado por la autoridad de aplicación; el mismo tendrá una vigencia indefinida y abarcará para sus previsiones un periodo de quince años y deberá ser actualizado cada cinco años.

Con el objeto de fomentar y fortalecer el aprovechamiento de los residuos sólidos, en condiciones adecuadas para la salud y el ambiente, la autoridad de aplicación en coordinación con el MIC (Ministerio de Industria y Comercio) podrá (con el apoyo de los sectores industriales y la participación de las universidades y/o centros de investigación), adelantar estudios de valoración de residuos potencialmente aprovechables, con el fin de promocionar la recuperación de nuevos materiales, disminuir las cantidades de residuos a disponer y reunir la información técnica, económica y empresarial necesaria para incorporar dichos materiales a los procesos productivos.

4.4 Principales alternativas tecnológicas para el aprovechamiento energético por medio de conversión termoquímica de residuos de madera

En la Figura 7, se muestran las formas de energía (calor, electricidad, combustibles) que pueden obtenerse a partir del aprovechamiento de la biomasa y los caminos que la misma debe seguir, para la obtención de dicha energía.

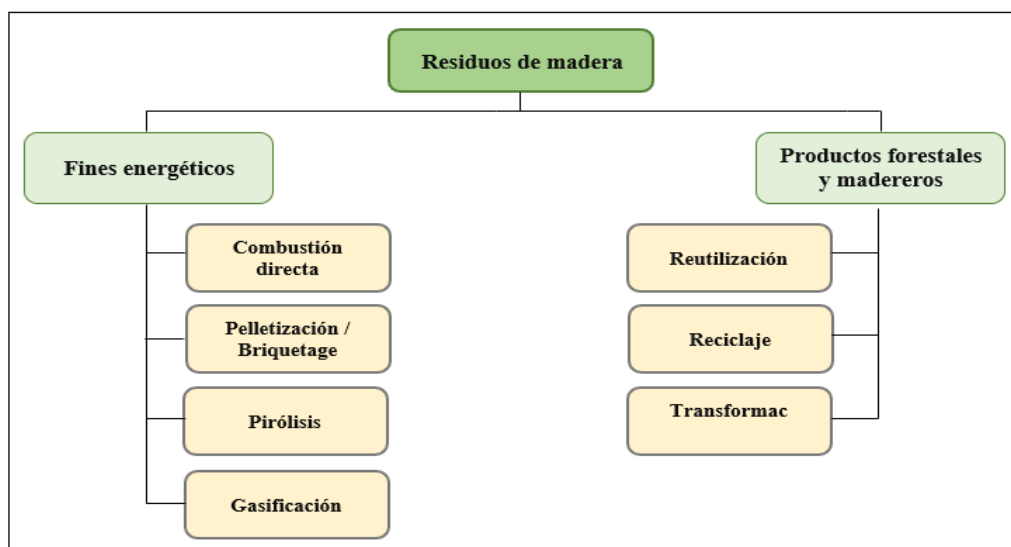
Figura 7. Formas de energía producida a partir de la biomasa.



Fuente: adaptado de Pavan, 2010.

Por medio de las alternativas tecnológicas destinadas al aprovechamiento energético de la biomasa, se podrían generar energía calorífica, eléctrica como también combustibles para otros procesos; aparte del empleo con el objetivo de producción energética, podrían darse otros usos como ser la reutilización, reciclaje y transformación en productos con valor agregado. En el presente trabajo, se estudiarán los procesos de conversión termoquímica con fines energéticos a través de la combustión directa, pelletización, pirólisis y gasificación (Figura 8).

Figura 8. Alternativas tecnológicas para el uso de residuos de madera.



Fuente: adaptado de Wiechteck (2009).

4.4.1 Combustión directa

Se refiere a la quema de biomasa en presencia de aire; esta combustión, es usada comúnmente para convertir la energía química almacenada en la biomasa en calor, energía mecánica o electricidad. Es posible quemar cualquier tipo de biomasa con contenido de humedad menor a 50%; en caso contrario, es necesario un pretratamiento de secado.

La combustión directa a pequeña escala para cocina doméstica y calefacción de espacios es considerada ineficiente debido a que se pierde entre 30% y 90% de transferencia de calor durante el proceso. La combustión de biomasa a gran escala se puede llevar a cabo en estufas, hornos, calderas, turbinas de vapor y turbogeneradores, en los cuales la transferencia de calor es mucho más eficiente (DEMIRBAS, 2001).

El proceso genera la oxidación del carbono e hidrógeno presentes en la celulosa, hemicelulosa, lignina y otras moléculas, para formar CO_2 y H_2O . Existen otras fuentes no menores de contaminación asociadas a este proceso como: emisiones en forma de gas o material particulado, producción de cenizas y escoriación dentro de la cámara de combustión.

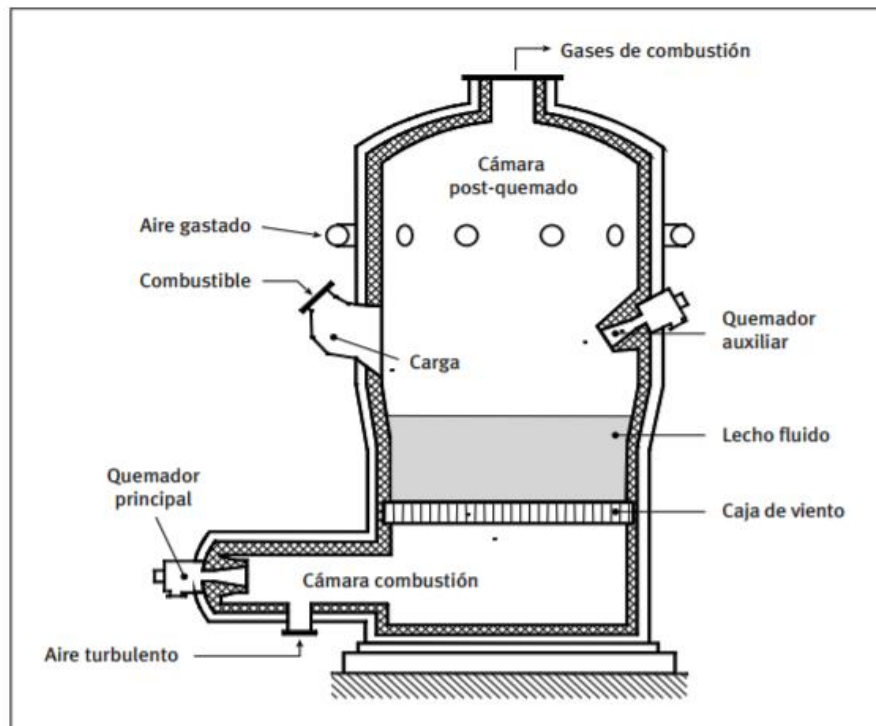
El poder calorífico de un material se define como la cantidad de calor liberado durante la combustión de la unidad de masa o volumen y puede describirse como un valor calorífico más bajo o más alto (ALMEIDA, 2016), es decir, se refiere a la cantidad de energía generada por kilogramo de sustancia durante el proceso. La biomasa de madera y residuos agroindustriales contienen entre 12 MJ/kg y 18 MJ/kg de valor calorífico, mientras que los pellets tienen valores ligeramente superiores (20 MJ/kg) (AYALA-MENDIVIL & SANDOVAL, 2018).

La combustión directa con cogeneración es similar a la combustión directa, pero se genera energía eléctrica además de térmica, a partir de la quema en caldera de residuos de biomasa disponibles, en forma de astillas, aserrín, residuos forestales, esquejes de paneles, etc., mediante el uso de un complejo turbina-generador que permiten aprovechar el vapor generado en la caldera (MOSCOSO, 2016). A continuación, en el Cuadro 7, se muestran los datos característicos de la tecnología. Las Figuras 9 muestra el proceso de combustión en lecho fluido (CLF) estacionario, y la Figura 10, un sistema simplificado de combustión de biomasa.

Cuadro 7. Aspectos característicos de tecnología combustión directa y combustión directa con cogeneración.

Aspecto	Combustión	Combustión con cogeneración
Factor de planta ⁴	86,6 - 94,2%	76 - 91%
Eficiencia de conversión ⁵	15 - 38%	80%
Costos de inversión	650 - 1.500 (US\$/kW)	2.575 - 3.664 (US\$/kW)
Costos de operación y manutención	6 - 35 (US\$/kW/año)	63 - 81 (US\$/kW/año)
Poder calorífico (biomasa de madera)	12 - 18 (MJ/kg)	----

Fuente: adaptado de Moscoso, 2016.

Figura 9. Combustión en lecho fluido (CLF) estacionario⁶.

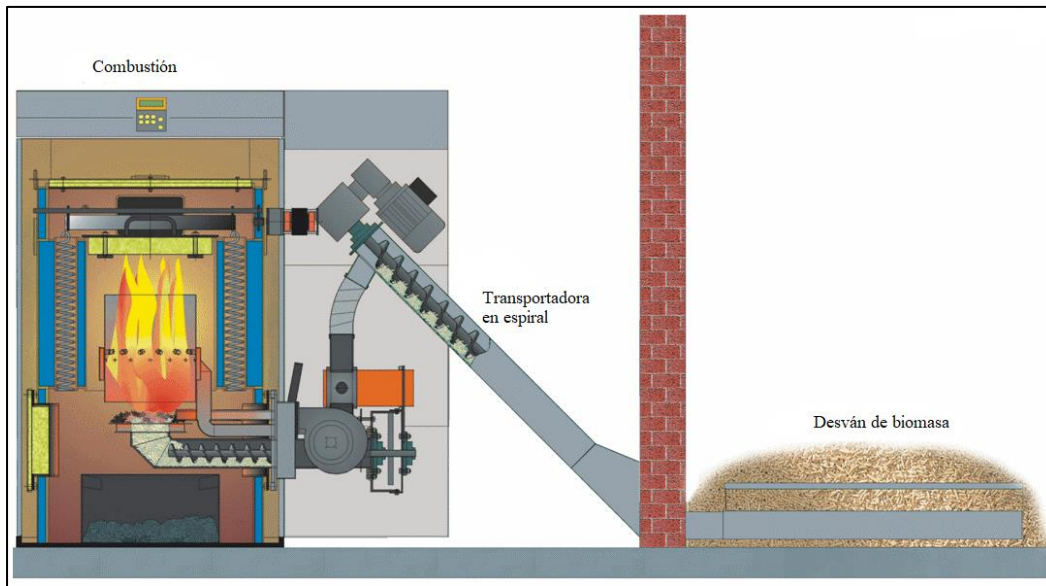
Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (ESPAÑA, 2008).

⁴ Es la razón entre la energía real generada por una central eléctrica, eólica, solar, térmica u otras, y la energía que podría generarse si hubiera trabajado al 100%, entendiendo que los equipos de generación deben detenerse para realizar mantenimientos y reparaciones.

⁵ Es la relación, en términos de energía, entre la entrada y la salida útil de una máquina de conversión energética. Tanto la entrada como la salida útil, puede ser química, energía eléctrica, trabajo mecánico, luz (radiación) o calor.

⁶ En el **Anexo A**, se presentan figuras complementarias de las tecnologías de aprovechamiento energético.

Figura 10. Sistema simplificado de combustión de biomasa.



Fuente: adaptado de Rincón, 2014.

4.4.2 Pelletización y/o briquetaje

La producción de pellets y/o briquetas de madera es una alternativa para el uso de residuos de madera con fines energéticos, reemplazando el uso tradicional de madera y carbón vegetal (WIECHTECK, 2009). Según Barros (2013), el proceso de briquetaje consiste en la compactación de la masa de residuos, con el objetivo de transformarla en un sólido geométrico de alta densidad; durante este proceso, se calienta el material a temperaturas superiores a 100°C, condición en la que la lignina presente en los residuos de la madera es plastificada, y promueve la adhesión de las partículas del material, lo que dispensa la utilización de aglutinantes naturales o químicos.

Para producir los pellets se utiliza principalmente aserrín, aunque también son utilizados: ramas de árboles, copas de árboles, corteza y residuos de raleos tempraneros. Esta tecnología es una de las mejores formas de reciclaje, pues hace un uso completo de la biomasa de madera, bagazo de caña de azúcar, la cáscara de arroz y muchos otros tipos más.

Estos procesos tienen ventajas como el aumento del contenido energético del material por unidad de volumen (1 m³ de briquetas contiene por lo menos 5 veces más energía que 1 m³ de residuos); la facilitación del transporte y almacenaje, y la reducción del tenor de humedad, tornando la briqueta más resistente a la degradación comparando con los residuos de la que son elaboradas. Así también podrían mencionarse como desventajas, las grandes inversiones y los gastos de energía en el proceso, como también la necesidad de evitar que sustancias

contaminantes o tóxicas sean integradas al producto final (BARROS, 2013). A continuación, en el Cuadro 8 se muestran los aspectos característicos de la pelletización. La Figura 11, muestra pellets y briquetas elaborados de residuos de madera; en las Figuras 12 y 13, se observan equipos de combustión de pellets, para generación de calor y/o electricidad.

Cuadro 8. Aspectos característicos de tecnología de producción de pellets.

Pelletización	
Factor de planta	77%
Eficiencia de conversión	36%
Costos de inversión	3.118 (US\$/kW)
Costos de operación y mantención	155 (US\$/kWh/año)
Valor calorífico de pellets	20 (MJ/kg)

Fuente: adaptado de Moscoso, 2016.

Figura 11. Pellets y briquetas elaborados a partir de residuos de madera.

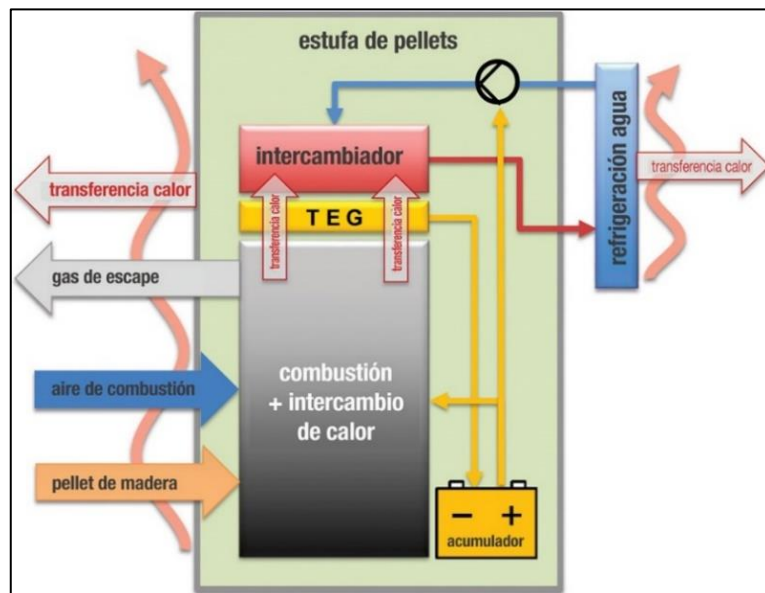


Fuente: Panatec Power Solutions, s.f.



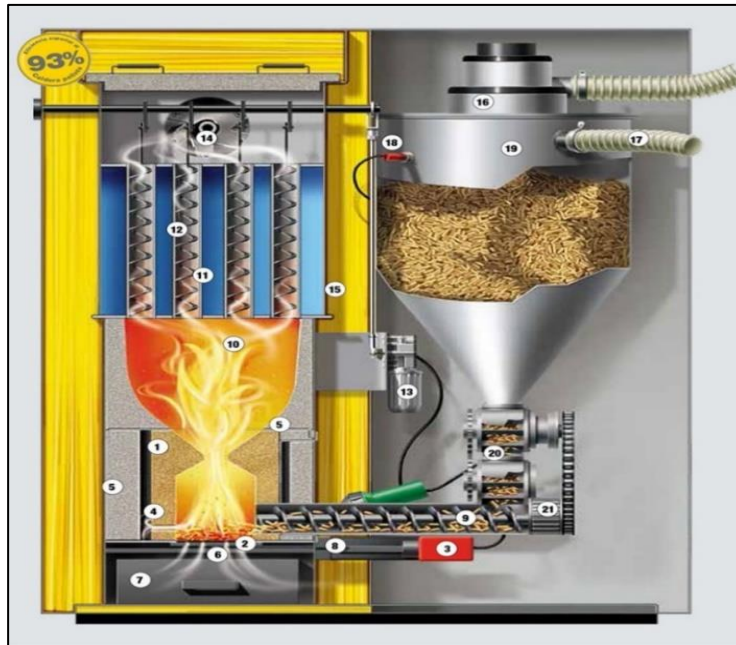
Fuente: Jordi Segú S.L., 2012.

Figura 12. Estufa de pellets con generador termoeléctrico (micro cogeneración).



Fuente: Bioenergy International, 2017.

Figura 13. Caldera de pellets de alto rendimiento.

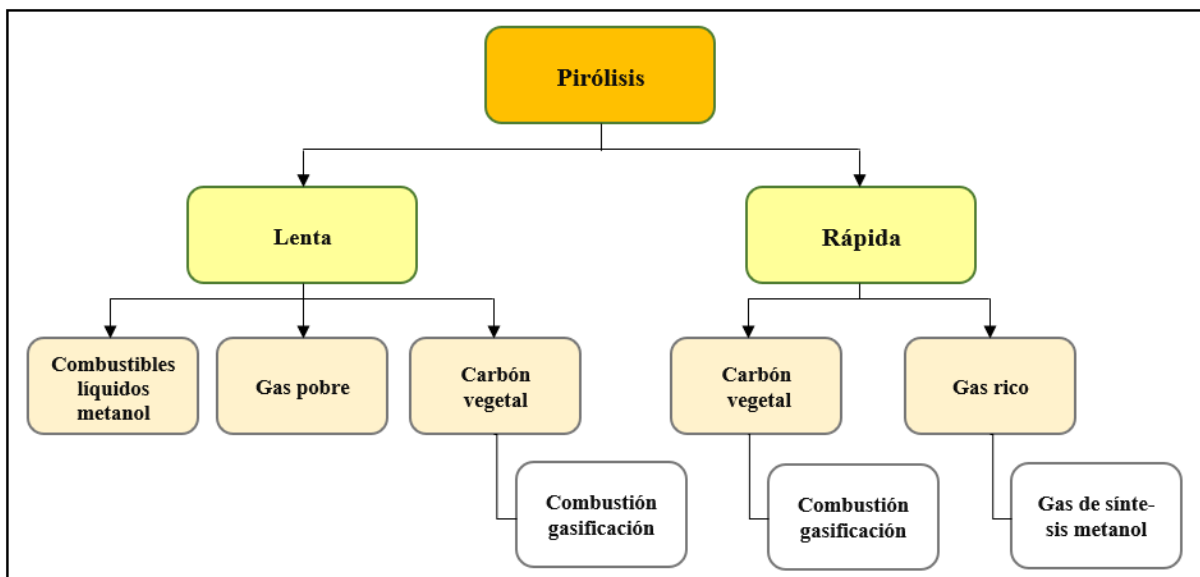


Fuente: Hargassner, 2015b.

4.4.3 Pirólisis

Es el proceso de descomposición de materiales a través de una oxidación incompleta en ausencia de oxígeno, que genera compuestos sólidos, líquidos y gaseosos, aptos como materiales para distintas industrias o como combustibles (ESPAÑA, 2007a). Es la primera fase de la combustión de la madera. La Figura 14 presenta los principales productos de la pirólisis.

Figura 14. Principales productos de la pirólisis.



Fuente: elaboración del autor.

Es método termoquímico en el cual la biomasa se convierte en líquido (bioaceites y biocrudos), carbón vegetal y gases no condensables, ácido acético, acetona y metanol, calentándola a alrededor de 500°C en ausencia de oxígeno (AYALA-MENDIVIL & SANDOVAL, 2018).

Para que se lleve a cabo, se requiere de una caldera o mufla (horno que opera a muy altas temperaturas) donde ocurre una degradación térmica en ausencia de oxígeno. En general, durante el proceso se genera entre 2 y 4% de cenizas. La pirólisis de baja temperatura ocurre hasta 550°C y se utiliza para producir aceites y alquitranes. La pirólisis de temperatura media ocurre entre 550°C y 800°C, donde se obtiene metano e hidrocarburos superiores. Por último, la pirólisis de alta temperatura se efectúa a temperaturas mayores a 800°C, para producción de gas con bajo poder calorífico (MOSCOSO, 2016).

En el caso de pirólisis rápida, la biomasa se calienta a 500°C, con lo que se obtiene un rendimiento de productos de 75% de líquido, 12% de sólido y 13% de gas. Este tipo de proceso es de gran interés para la producción de combustibles líquidos, los cuales pueden almacenarse y transportarse fácilmente, para su posterior uso en la producción de energía y otros productos químicos (BRIDGWATER, 2012). Los aspectos característicos principales de la pirólisis, se presentan en el Cuadro 9.

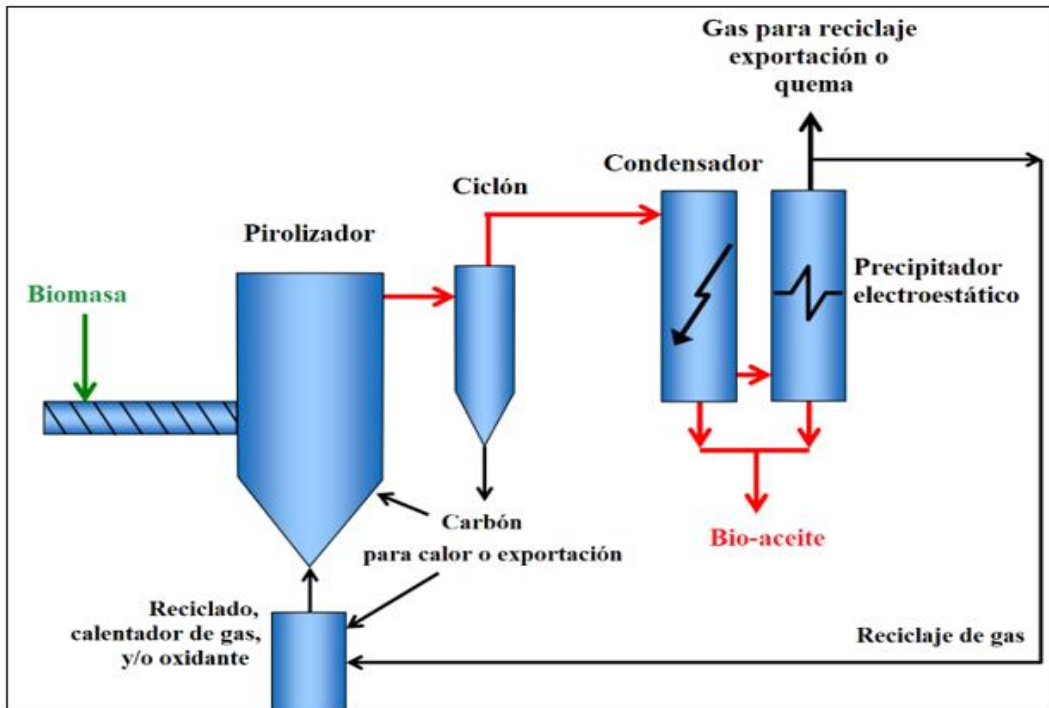
Cuadro 9. Aspectos característicos de tecnología pirólisis

Pirólisis		
Factor de planta		80 - 90%
Eficiencia de conversión		60 - 70%
Costos de inversión		1.200 - 3.700 (US\$/kW)
Costos de operación y mantención		894 (US\$/kW/año)
Poder calorífico	Gases	Media: 3,8 a 15,9 (MJ/m ³) hasta 21 MJ/m ³ - pirólisis flash
	Líquidos (ácido piroleñoso)	Media: 16 a 19 (MJ/kg) hasta 25,1 (MJ/kg)
	Sólidos (carbón)	Media: 26,7 a 29 (MJ/kg) hasta 35 (MJ/kg)

Fuente: adaptado de Moscoso, 2016.

En la Figura 15 se muestra el proceso de pirólisis en lecho fluidizado, y en la Figura 16, se pueden observar la pirolización artesanal y la industrial.

Figura 15. Pirólisis en lecho fluidizado.



Fuente: adaptado de Rincón, 2014.

Figura 16. Pirolizador de cilindro (artesanal) y pirolizador de flujo continuo (industrial).



Fuente: Trinidad, 2019.

4.4.4 Gasificación

La gasificación es el proceso térmico en el que se agrega oxígeno por debajo de la relación estequiométrica a los materiales sólidos, lo que provoca reacciones de oxidación parcial (LOMBARDI, CARNEVALE & CORTI, 2012).

La gasificación de la madera es una alternativa adecuada para la transformación energética de los residuos de madera, como una fuente barata de generación de energía (térmica y eléctrica). Permite convertir la biomasa sólida en un gas combustible a través de una serie de reacciones químicas a temperaturas variables, con el uso de aire, oxígeno, vapor de agua o una mezcla de ellos como agente oxidante (AYALA-MENDIVIL & SANDOVAL, 2018). Con este proceso se pueden producir gases con valor calorífico de 4 MJ/m³ a 6 MJ/m³, los cuales pueden utilizarse para combustión directa (incluida la quema de residuos en calderas de generación de vapor) o como combustible para motores de combustión interna y externa, lo que recibe el nombre de “gas producto” (WIECHTECK, 2009).

El gas producido también puede usarse como materia prima en la producción de otros químicos (en ese caso recibe el nombre de gas de síntesis). Permite la producción de metano, hidrógeno, biogasolina y biodiesel, los cuales son de gran importancia en el futuro de los combustibles (McKENDRY, 2002). La gasificación puede ser de baja temperatura (700°C – 1.000°C), cuyo producto tendrá mayor concentración de hidrocarburos que la gasificación de alta temperatura, que puede ser quemado para calefacción o generación de electricidad mediante turbina de vapor o, luego de un adecuado tratamiento de limpieza, mediante motor de combustión interna. La gasificación de alta temperatura (1.200°C – 1.600°C) genera un producto bajo en hidrocarburos y alto en CO y H₂ (gas de síntesis – syngas) (MOSCOSO, 2016). En el Cuadro 10, se muestran los aspectos característicos de la tecnología.

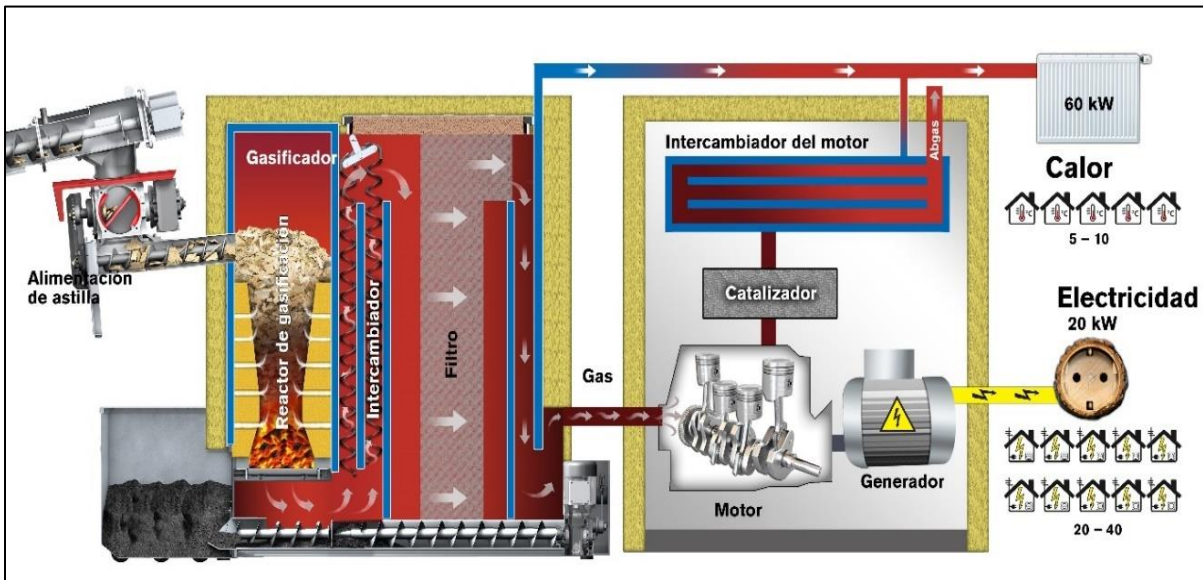
Cuadro 10. Aspectos característicos de tecnología gasificación.

Gasificación	
Factor de planta	85 - 95%
Eficiencia de conversión	35 - 40%
Costos de inversión	1.200 - 3.700 (US\$/kW)
Costos de operación y mantenimiento	298 (US\$/kW/año)
Poder calorífico de gases producidos	4 - 6 (MJ/m ³)

Fuente: adaptado de Moscoso, 2016.

La Figura 17 muestra un sistema de gasificación de biomasa con cogeneración (electricidad y calor), y la Figura 18, un equipo gasificador con tratamiento de syngas (gas combustible para motores alternativos de combustión interna).

Figura 17. Gasificador con cogeneración (electricidad y calor) a partir de biomasa.



Fuente: Hargassner, 2016.

Figura 18. Gasificador y sistemas de tratamiento de syngas.



Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (ESPAÑA, 2007b).

4.5 Análisis de ciclo de vida

El ACV (Análisis del Ciclo de Vida) de un producto, es una metodología que intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto (RODRÍGUEZ, 2003). Por ejemplo, parte desde la adquisición una materia prima, la producción, el uso y la disposición final, de acuerdo con el objetivo y alcances establecidos.

Comúnmente se considera que las energías provenientes de la biomasa son carbono neutral, debido a que el CO₂ fue absorbido previamente por las plantas y árboles para su crecimiento. Sin embargo, de acuerdo con los lineamientos del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), el uso de la biomasa para producción de energía no es considerado automáticamente neutro en emisiones de carbono, debido a impactos relacionados como: procesamiento y transporte de la biomasa, emisiones directas de CH₄ y N₂O por combustión, entre otros. Con ayuda del ACV, se pueden incluir tales actividades en un estudio de impacto ambiental (MOSCOSO, 2016).

4.6 Criterios para definición de alternativas tecnológicas aplicables en Paraguay

Para la definición de las alternativas de aprovechamiento energético de los residuos de madera, se evaluaron el conjunto las normativas existentes para dicho ámbito, las tecnologías desarrolladas y aplicadas para producir energía a partir de este tipo de materia prima, los datos locales de generación, gestión y manejo de los residuos sólidos, las informaciones técnicas y estadísticas sobre actividades productivas y ocupaciones de la población, como la caracterización general del área de estudio.

Se analizó la política energética nacional, de modo a poder verificar la existencia de directrices sobre recuperación energética de residuos de biomasa, y que los lineamientos del estudio sean compatibles con los de dicha política, tanto a corto, mediano y largo plazo.

También se observó la matriz de oferta y demanda energética nacional del Paraguay, de modo a sugerir alternativas técnicas válidas y viables económica, ecológica y ambientalmente, buscando que estas aporten de forma consecuente, y así aumentar la oferta a nivel país, sin que esto llegue a representar una acentuación de la presión sobre los recursos naturales, en especial, los bosques nativos, cuya superficie ha disminuido progresivamente debido a la tasa de deforestación existente en las últimas décadas en el territorio paraguayo.

Para el presente estudio, se eligió la conversión termoquímica de la madera, ya que es la forma de aprovechamiento más difundida en el país, representando una de las fuentes energéticas principales. No se evaluó la conversión bioquímica (digestión y/o fermentación), pues los residuos empleados para estos procesos, son de composición estructural diferente, por lo tanto, las comparaciones se harían dificultosas, y por otra parte, están aún menos difundidas en el país, por lo que su aporte a la matriz energética es comparativamente menor.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis de normativas

En el Cuadro 11 se exhibe un compendio de la clasificación de residuos sólidos según las normativas de Brasil y Paraguay estudiadas en el presente trabajo y aplicadas actualmente en la gestión de dichos residuos.

Cuadro 11. Compendio de clasificación de residuos sólidos según normativas de Brasil y Paraguay.

(continua)

País	Normativa	Clase de residuos	
Brasil	Ley 12.305/2010	I- En cuanto a su origen	a) Residuos domésticos
			b) Residuos de limpieza urbana
			c) Residuos sólidos municipales
			d) Residuos de establecimientos comerciales y proveedores de servicios
			e) Residuos de servicios públicos de saneamiento
			f) Residuos industriales
			g) Residuos de servicios de salud
			h) Residuos de construcción
			i) Residuos agroforestales
			j) Residuos de los servicios de transporte
			k) Residuos mineros
	II- Con respecto a la peligrosidad	a) Residuos peligrosos	
		b) Residuos no peligrosos	
	ABNT NBR 10.004/2004	Residuos de clase I: peligrosos	Inflamabilidad
			Corrosividad
			Reactividad
			Toxicidad
Patogenicidad			
Residuos de clase II: no peligrosos		Residuos de clase II A – No inerte	
		Residuos de clase II B – Inerte	

Cuadro 11. Compendio de clasificación de residuos sólidos según normativas de Brasil y Paraguay.

(conclusión)

País	Normativa	Clase de residuos	
Paraguay	Decreto 7.391/2017	I. Residuos sólidos urbanos	-----
		II. Residuos de manejo especial considerados como no peligrosos	a) Los provenientes de servicios de salud.
			b) Los residuos industriales.
			c) Los generados por las actividades agrícolas, pesqueras, forestales y pecuarias.
			d) Los de servicios de transporte.
			e) Los residuos de la construcción civil.
			f) Los residuos tecnológicos provenientes de las industrias de informática.
			g) Los lodos deshidratados o aquellos lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.
			h) Los neumáticos usados, muebles, enseres domésticos usados en gran volumen, plásticos y otros materiales de lenta degradación.
			i) Los de laboratorios industriales, químicos, biológicos, de producción o de investigación.
j) Los residuos de minería e hidrocarburos.			
k) Los demás que sean determinados por Decreto del Poder Ejecutivo o por la Autoridad de Aplicación de común acuerdo con las gobernaciones y las municipalidades.			
III. Residuos peligrosos	-----		

Fuente: elaboración del autor en base a normativas mencionadas.

De dichas normativas, se podrían tipificar los residuos de la madera (tomados para la presente investigación) teniendo en cuenta criterios específicos, pudiendo clasificarse según normativa de Brasil principalmente como residuos de limpieza urbana, residuos agroforestales, residuos no peligrosos inertes; según normativa de Paraguay, podrían ser clasificados como residuos sólidos urbanos, residuos generados por las actividades agrícolas, pesqueras, forestales y pecuarias.

En el Cuadro 12, se presenta un resumen de las normativas analizadas en el presente trabajo, referentes al manejo de los residuos sólidos y su aprovechamiento energético, tanto para Paraguay como para Brasil. Los conceptos y principios esgrimidos en ambos países guardan semejanza con diferencias particulares; uno de los aspectos distintos más resaltantes que se podrían rescatar, es el establecimiento de la Portaria Interministerial (Brasil), para la

recuperación energética de los residuos sólidos, como un mecanismo de trabajo interinstitucional de régimen oficial, que ayuda a fortalecer los esfuerzos para llegar a un manejo adecuado de los residuos sólidos y darles una destinación correcta.

Cuadro 12. Resumen de principales normativas referentes a la gestión de residuos sólidos.

Normativas	Paraguay	Brasil
Ley gestión de residuos sólidos	Ley n° 3.956/2009 Gestión Integral de los Residuos Sólidos	Ley n° 12.305/2010 Política Nacional de Residuos Sólidos
Decreto reglamentario de la Ley de residuos sólidos	Decreto n° 7.391/2017	Decreto n° 7.404/2010
Clasificación de residuos sólidos	Decreto n° 7.391/2017	Ley n° 12.305/2010
		Norma ABNT 10.004/2004
Recuperación energética de residuos sólidos	Decreto n° 7.391/17	Portaría Interministerial n° 274/ 19
Política energética nacional	Decreto n° 6.092/2016	Ley n° 9.478/1997

Fuente: elaboración del autor.

Para el caso de Paraguay, se ha encontrado la existencia de normativas para la gestión y manejo de los residuos sólidos, las cuales son la Ley n° 3.956/2009, con su correspondiente Decreto Reglamentario n° 7.391/2017 (que establece los lineamientos para la aplicación de la misma). Entre los puntos más destacables, se menciona que se establece la autoridad de aplicación, las definiciones principales, la clasificación de los residuos sólidos, los planes de gestión nacional, departamental y municipal; se menciona la recuperación energética y aprovechamiento de los residuos sólidos, con lo que se busca el empleo de los mismos como fuente de energía alternativa, de modo racionalizar el uso de fuentes naturales primarias, darles valor económico y energético, como también reducir la cantidad de residuos destinados a disposición final.

En cuanto a la política energética nacional, esta se encuentra detallada en el Decreto n° 6.092/2016, establece una visión estratégica que busca atender las necesidades de energía de la ciudadanía y los distintos sectores a corto plazo (2017–2023), mediano plazo (2024–2030) y largo plazo (2031–2040), basados en calidad, responsabilidad social y ambiental, con eficiencia en el aprovechamiento de los recursos energéticos. Se establecen objetivos estratégicos que apuntan a alcanzar dicha visión, entre ellas la de fomentar el uso de bioenergía y otras fuentes alternativas. En vista a este aspecto, integrar la recuperación energética de los residuos sólidos, podría representar una herramienta de valioso aporte dentro de la matriz energética nacional.

Con estas herramientas mencionadas, se dispone de un régimen jurídico de base para la gestión de los residuos sólidos, de modo a cumplir con los principios que apuntan a la sostenibilidad de la calidad ambiental y el bienestar humano. A través de esto se busca fortalecer a las instituciones involucradas en el ámbito de la gestión de los residuos sólidos, y garantizar la participación ciudadana, de modo a que la gestión sea influyente y aceptada.

5.2 Análisis de tecnologías de aprovechamiento energético⁷

Para el análisis de las tecnologías estudiadas, se tomaron como base los resultados del obtenidos por Moscoso (2016), en el estudio Evaluación ambiental de alternativas tecnológicas de aprovechamiento energético de residuos forestales mediante análisis de ciclo de vida (elaborado en Chile), por lo que fueron efectuadas adaptaciones para la situación del área de estudio y los requerimientos de la presente investigación.

5.2.1 Comparación de potencia generada por distintas tecnologías

En el Cuadro 13, se puede apreciar un resumen comparativo de la potencia generada con las alternativas tecnológicas descritas, para un caso específico de un flujo estudiado de 27 (t/mes) de virutas de madera (evaluado en el estudio tomado como guía metodológica).

Cuadro 13. Potencia generada con cada tecnología

Tecnología aplicada	Cantidad de residuos (t/mes)	Potencia generada (kW)	Relación potencia generada/cantidad de residuos (kW/t/mes)
Combustión directa	27	53	1,96
Pelletización	27	168	6,22
Pirólisis	27	73	2,70
Gasificación	27	53	1,96

Fuente: adaptado de Moscoso, 2016.

Se verificó que mediante la pelletización de los residuos se genera mayor potencia, lo cual se debe a que el producto que es combustionado tiene un mayor poder calorífico en comparación a los empleados en las otras tecnologías citadas.

Del análisis de los resultados, surge la necesidad de conocer el consumo de los equipos de cada tecnología estudiada, para poder determinar cuál es la mejor alternativa técnica. Se

⁷ En el **Apéndice A** se presentan las Figuras (gráficos) correspondientes a los datos generados en el análisis de las tecnologías de aprovechamiento y detallados en los cuadros respectivos.

determinó la potencia consumida por las bombas del sistema de generación y de cada uno de los equipos del proceso productivo de cada alternativa (MOSCOSO, 2016).

Considerando todos los consumos asociados al proceso productivo de cada alternativa, el estudio evaluado determinó la potencia neta generada por cada tecnología tecnológica para el flujo indicado (27 t/mes de virutas de madera), tal como se muestra en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Resumen de potencia generada y consumida por cada alternativa.

Tecnología aplicada	Potencia generada (kW)	Consumo total (kW)	Potencia neta generada (kW)
Combustión directa	53,30	0,90	52,40
Pelletización	168,0	3,50	164,00
Pirólisis	73,50	5,00	68,50
Gasificación	53,10	0,30	52,80

Fuente: adaptado de Moscoso, 2016.

La tecnología que mostró la mayor potencia neta generada es la pelletización, debido esencialmente a la potencia generada en relación a la cantidad de insumos empleados, ya que el consumo total del proceso de generación con dicha tecnología, no representa el menor número en relación con otras estudiadas, pero por la diferencia en proporción de generación, supera a las demás.

5.2.2 Análisis de ciclo de vida

Para este criterio, se evaluó el impacto ambiental de cada tecnología de acuerdo al PCG (Potencial de Calentamiento Global⁸). En el Cuadro 15, se muestran datos comparativos de las distintas alternativas en base a tal indicador.

Cuadro 15. Análisis del PCG de las tecnologías.

Tecnología aplicada	PCG (kgCO₂eq)
Combustión directa	210.682
Pelletización	181.424
Pirólisis	32.701
Gasificación	29.635

Fuente: adaptado de Moscoso, 2016.

⁸ El IPCC utiliza el concepto de PCM para comparar la capacidad que distintos gases tienen para atrapar el calor en la atmósfera en relación a la que posee el dióxido de carbono.

De acuerdo con los resultados de PCG, la tecnología más intensiva en emisiones de CO₂ equivalente es la combustión directa, seguida por la pelletización, la pirólisis y la gasificación de las virutas de madera.

En el estudio se pudo estimar que, desde un punto de vista ambiental, la alternativa más atractiva es la gasificación, seguida por la pirólisis. Esto porque las emisiones para estas dos tecnologías son análogas, 29.635 (kgCO₂eq) para la gasificación y 32.701 (kgCO₂eq) para la pirólisis, por lo que se consideró que ambas son igualmente atractivas desde la perspectiva ambiental, por ello, para escoger la alternativa más atractiva, se deberá tener en cuenta otros aspectos del análisis de las tecnologías.

5.2.3 Análisis económico: costo de inversión

El costo total por equipos para cada tecnología estudiada y la inversión total⁹ para cada caso, se presentan en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Costos de inversión total y de equipos para cada tecnología.

Tecnología aplicada	Costo de equipos (US\$)	Inversión total (US\$)
Combustión directa	88.829,07	324.360,70
Pelletización	160.161,51	582.772,54
Pirólisis	183.041,72	664.872,14
Gasificación	246.298,79	895.020,19

Fuente: adaptado de Moscoso, 2016.

Se puede observar, que la tecnología que requiere mayor inversión es la gasificación, debido a que la cámara de gasificación es bastante costosa, en comparación con los equipos utilizados en otros procesos, ya que requiere condiciones de operación muy precisas según menciona Moscoso (2016).

Tanto la pelletización como la pirólisis presentan un costo de inversión intermedio, asociado a que estas alternativas cuentan con muchos más equipos que las demás, puesto que el residuo original debe pasar por diversas operaciones para transformarse en un combustible aprovechable, y por otra parte, la combustión directa posee un proceso productivo más sencillo. Comparando las inversiones totales de cada tecnología descrita, se infiere que aquella más

⁹ El estudio original tomado de base fue realizado en Chile, siendo el tipo de cambio empleado para las adaptaciones de 1 US\$ = 743 CLP (tomado de la cotización a oct/2019).

atractiva, considerando solamente el costo de inversión (aspecto económico), es la combustión directa.

5.2.4 Análisis económico: costo de operación

En el estudio base, para realizar la comparación de los costos de operación de las alternativas, sólo se consideraron los costos directos de producción, ya que otras expensas como gastos fijos, costos generales (salud, seguridad, recreación, etc.), gastos administrativos, de distribución, marketing e investigación y desarrollo, serían comunes para todas las tecnologías de aprovechamiento energético, de modo que no proporcionarían información adicional a la comparación. Se consideró además, gastos asociados al consumo específico de electricidad, agua de enfriamiento y vapor de cada tecnología (MOSCOSO, 2016). Se presenta el Cuadro 17, donde se resumen los costos de operación de cada alternativa tecnológica.

Cuadro 17. Costos de operación mensual para cada tecnología.

Tecnología aplicada	Costos de operación (US\$/mes)
Combustión directa	2.436,07
Pelletización	3.028,26
Pirólisis	2.772,54
Gasificación	2.678,33

Fuente: adaptado de Moscoso, 2016.

Del Cuadro 17, se desprende que la alternativa más favorable desde el punto de vista económico operativo, es la combustión directa, seguida por la gasificación. Esto se debe a la simplicidad de dichos procesos, en comparación con la pelletización y la pirólisis, haciendo que se demande menos materias primas o servicios para lograr el aprovechamiento energético de los residuos de la madera. Por otro lado, la pelletización es aquella con mayores costos de operación, lo que podría deberse a que las etapas del proceso son intensivas en consumo de energía eléctrica, pudiendo así elevar los costos.

5.2.5 Análisis comparativo de impacto ambiental y costos en relación a potencia generada

Se relacionaron los distintos aspectos de evaluación de las alternativas tecnológicas, para poder compararlas entre sí y precisar cuál es la más atractiva, de modo a poder establecer la

alternativa que posea alta generación de energía eléctrica y niveles bajos de impacto ambiental como de costo económico.

Para poder establecer tal cotejo, se definieron indicadores de eficiencia ambiental y económica, determinados una parte por el cociente entre el PCG y la potencia generada, y otra, por el cociente entre los costos de operación y la potencia generada, cuyos resultados se presentan en el Cuadro 18.

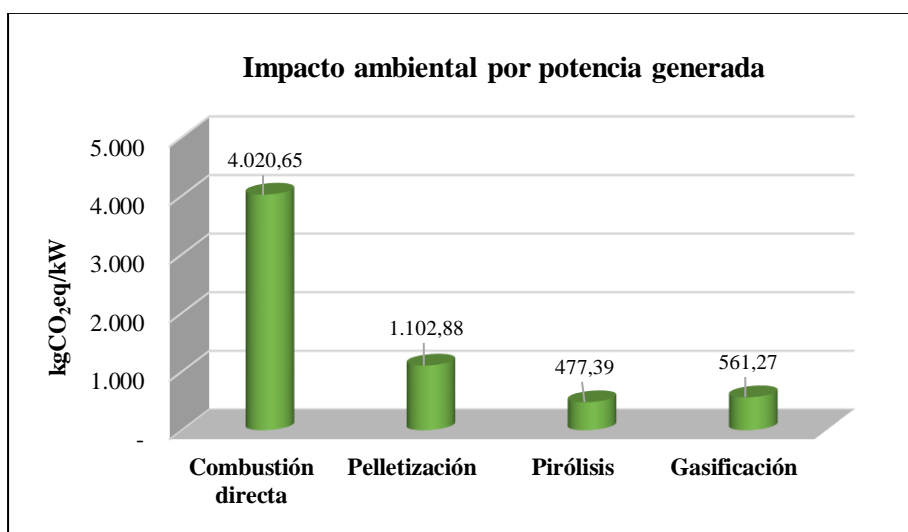
Cuadro 18. Análisis comparativo de impacto ambiental y costos de operación en relación a potencia generada.

Tecnología aplicada	Impacto ambiental por potencia generada (kgCO ₂ eq/kW)	Costos de operación por potencia generada (US\$/kW)
Combustión directa	4.020,65	46,49
Pelletización	1.102,88	18,41
Pirólisis	477,39	40,48
Gasificación	561,27	50,73

Fuente: adaptado de Moscoso, 2016.

En el Cuadro 18 y Figura 19, se puede apreciar que la combustión directa es la tecnología que más emisiones de CO₂eq por kW de energía generada arroja, y que la alternativa más atractiva considerando el impacto ambiental generado, es la pirólisis, debido a que es la tecnología que genera menos emisiones por kW. Se dedujo igualmente, que la gasificación es también una alternativa tecnológica atractiva, debido a que arroja bajo impacto ambiental por kW, comparando con las otras tecnologías analizadas.

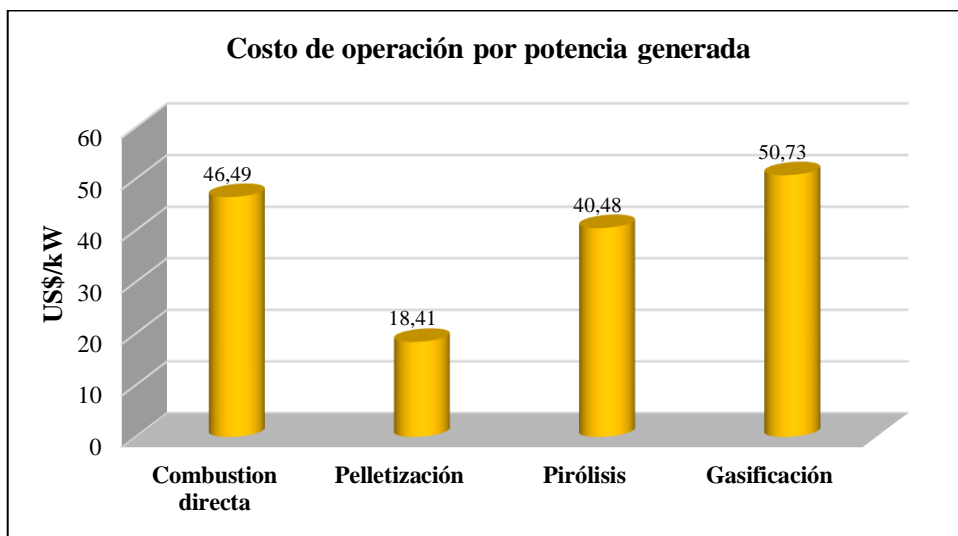
Figura 19. Comparación impacto ambiental y potencia generada por cada alternativa.



Fuente: elaboración del autor en base a datos de Moscoso, 2016.

En referencia al costo de operación por potencia generada, los resultados mostrados en el Cuadro 18 y Figura 20, señalan que la gasificación es la alternativa más costosa por kW de electricidad generada, y que la tecnología más interesante desde el punto de vista económico es la pelletización, ya que la misma presenta menores costos de operación por kW de electricidad generada. Moscoso (2016) menciona que dicho resultado, se debe a que la generación de energía mediante combustión de pellets es la que produce mayor potencia, de modo que los costos de operación por kW, se resaltan menores en comparación con las otras alternativas.

Figura 20. Comparación costos de operación y potencia generada por cada alternativa.



Fuente: elaboración del autor en base a datos de Moscoso, 2016.

5.2.6 Resumen de tecnologías recomendadas según análisis comparativo

En el Cuadro 19, se presenta un resumen, donde se indica cual tecnología de aprovechamiento sería más recomendada, según cierta característica específica de selección, tomadas de los resultados obtenidos y analizados para la presente investigación.

Cuadro 19. Tecnología recomendada según análisis comparativo.

Características	Tecnología recomendada
Potencia generada	Pelletización
Análisis de ciclo de vida (PCG)	Gasificación
Costo de inversión	Combustión directa
Costo de operación	Combustión directa
Impacto ambiental por potencia generada	Pirólisis
Costos de operación por potencia generada	Pelletización

Fuente: elaboración del autor en base a resultados analizados.

De la evaluación energética se determinó, que la alternativa más interesante, considerando la potencia neta generada, es la pelletización. Atendiendo la herramienta de análisis de ciclo de vida, se estableció que la tecnología que genera el menor impacto ambiental, desde el punto de vista del potencial de calentamiento global, es la gasificación.

En referencia a los resultados del análisis económico, se determinó que la alternativa que posee menores costos tanto de inversión y operación fue la combustión directa. Por otro lado, aquella que presentó mayores costos de inversión fue la gasificación, y la que arrojó mayores costos de operación, fue la pelletización. La pirólisis representó la tecnología de menor impacto ambiental por potencia generada, y por su parte, la que arrojó menores costos de operación por potencia generada, fue la pelletización.

Atendiendo este resumen, se pueden generar recomendaciones técnicas, apuntando a atender ciertas características específicas, adaptadas a la realidad en la que podrían instalarse y operar las tecnologías de aprovechamiento energético evaluadas.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones y recomendaciones sobre gestión de residuos forestales en Paraguay

Existen normativas legales que indican como debe ser la gestión de los residuos sólidos a nivel nacional, departamental y municipal, lo cual, con una correcta aplicación, puede orientar y permitir obtener mejoras en el manejo ambiental de los mismos. Faltan normativas legales y técnicas específicas para el manejo y aprovechamiento energético de los residuos de madera, que se generan en diversas actividades, lo cual sería importante, atendiendo que el aprovechamiento de la dendroenergía está ampliamente difundido en el país, tanto a nivel domiciliar como industrial, y con perspectiva de mantenerse por varios años.

Se debe fortalecer el trabajo integrado y transparente entre instituciones y organizaciones involucradas e interesadas en el ámbito forestal, ambiental y energético. Se podría adoptar el modelo de resoluciones interinstitucionales oficiales, como el caso de la Portaria Interministerial para recuperación energética de los residuos sólidos (Brasil), con lo que se integrarían los esfuerzos de las instituciones que trabajan en el ámbito del manejo de los residuos sólidos (MADES, gobernaciones, municipios), las del sector forestal (INFONA, MAG, MADES) y del sector energético (VMME, ANDE, ITAIPÚ, YASYRETÁ), aparte de otras instituciones y organizaciones que podrían manifestar interés en el tema, como ser la DGEEC, MIC, FEPAMA, instituciones de formación e investigación, etc.

Una dificultad importante para la elaboración de la presente investigación, fue acceder a datos estandarizados, actualizados y sistematizados, especialmente en el área de manejo de residuos sólidos como en temas forestales. Un mecanismo que podría ayudar a la toma de decisiones apropiadas, sería generar una base de datos con las características mencionadas, y que sean accesibles a los tomadores de decisiones, investigadores como a todo interesado.

En vistas a la oferta decreciente de recursos forestales, el aumento de la población y con ello la demanda energética, a parte de la implementación del Plan Nacional de Reforestación (Paraguay), que busca revertir el proceso de desabastecimiento de materia prima de las industrias forestales, así como la falta de provisión de biomasa para uso energético, se debe trabajar en el aprovechamiento de los residuos de la madera (termoquímico y bioquímico), como también en la recuperación energética de otros tipos de residuos (herbáceos, domiciliarios, estiércoles, envases de defensivos agrícolas, etc.).

6.2 Conclusiones sobre alternativas de aprovechamiento energético

En el estudio tomado como modelo metodológico, los resultados en general, teniendo en cuenta los diversos criterios, indicaron que la tecnológica de aprovechamiento energético más atractiva fue la pirólisis, pues había presentado el menor impacto ambiental por potencia generada y un costo económico intermedio (de instalación y operación).

Sin embargo, si lo que se buscaba priorizar era obtener mayor aprovechamiento energético, la mejor alternativa hubiera sido la pelletización; esto porque representó la tecnología de aprovechamiento que generó mayor potencia energética, además de combinar bajos costos de operación por kW generado, con un bajo impacto ambiental.

Si el criterio prevaleciente fuera el impacto ambiental generado, la alternativa más válida y atractiva sería la gasificación, pero esta se muestra poco favorable económicamente, debido en parte, a que representa una tecnología que no genera tanta potencia eléctrica en comparación a las otras evaluadas.

En cambio, si se observaran solamente los resultados del análisis económico (costo de inversión y de operación), la elección sería la combustión directa, aunque la misma presenta desventajas desde el punto de vista ambiental y de potencia generada.

Del análisis de la realidad paraguaya, una directriz genérica para incentivar el proceso de aprovechamiento energético de la madera de residuos de actividades forestales y de poda urbana, sería estimular la adopción de la tecnología de pelletización, ya que en el país se emplea ampliamente la combustión directa de leña de madera sólida en hornos con bajos rendimientos energéticos (tanto domiciliarios como industriales), los cuales podrían ser sustituidos o adaptados para el empleo de la combustión de los pellets, lo que favorecería el rendimiento energético además de ofrecer una alternativa para el manejo adecuado y aprovechamiento de dichos residuos.

Posteriormente, con procesos de aprovechamiento afianzados, evaluar las posibilidades de inversión técnica y económico-financiera, para incorporar otras tecnologías, de modo a apuntar a atender más criterios técnicos (como ser el ambiental), así poder tener participación continua y sostenida en la matriz energética nacional. En dicho caso, se podría tener en cuenta la pirólisis, por las ventajas comparativas mencionadas anteriormente en la investigación, atendiendo los requerimientos técnicos que exigiría para la puesta en operación de los equipos específicos para dicha tecnología.

Impulsar la producción de dendrocombustibles sólidos como briquetas, pellets y chips de madera, provenientes de plantaciones forestales o del aprovechamiento de los residuos de

madera de las distintas actividades forestales y de podas urbanas, podría favorecer la conservación de los remanentes de bosques nativos, así como contribuir a la creación de nuevos empleos y el aumento de la eficiencia en el uso recursos de los dendroenergéticos.

Por otra parte y adicional a lo mencionado, trabajar en potenciar las fuentes de energías alternativas como las fotovoltaicas, eólicas y biocombustibles, ya que son aun ínfimamente explotadas en el país, y podrían tener potenciales aportes en la oferta de energía.

REFERENCIAS

ABBATE, J. La gestión de residuos sólidos urbanos en Paraguay. **Revista COOMECIPAR**, Asunción, n. 158, p. 36 - 37, nov 2011. Disponível em: <<http://www.geam.org.py/v3/blog/lagestion-de-residuos-solidos-urbanos-en-paraguay/>>. Acesso em: 1 oct 2019.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012 Edição especial de 10 anos**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo, 2012. 114 p.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo, 2017. 73 p.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo, 2019. 65 p.

ALMEIDA, B. O. D. **Viabilidade do aproveitamento de resíduos florestais**. Piracicaba, 2016. 96 p.

AYALA, L. M. C. **Evaluación del consumo de leña en secaderos de soja**. Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, 2011. 58 p.

AYALA-MENDIVIL, N.; SANDOVAL, G. Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. **Madera y Bosques**, Guadalajara, v. 24, n. e2401877, p. 1 - 14, oct 2018. Disponível em: <<http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v24nspe/2448-7597-mb-24-spe-e2401877.pdf>>. Acesso em: 22 oct 2019.

BARROS, V. C. C. **Briquetes produzidos com resíduos de poda urbana e embalagens cartonadas**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013. 45 p.

BID. **Herramientas para mejorar la efectividad del mercado de combustibles de madera en la economía rural. Informe Diagnóstico Paraguay**. Viena, 2008. 143 p.

BIOENERGY INTERNATIONAL. Microgeneración: estufa de pellets con generador termoeléctrico, 2017. Disponível em: <<https://bioenergyinternational.es/microgeneracion-estufa-de-pellets-con-generador-termoelectrico/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

BIOS BIOENERGIE SYSTEME. Planning of pellet production plants, 2015. Disponível em: <<https://www.bios-bioenergy.at/en/pellets/pellet-production-plants.html>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

BORSY, P.; ORTIZ, R. **Oferta y demanda de biomasa sólida en el Paraguay**. Seminario: Potencial de biomasa y biogás en el Paraguay. San Lorenzo: VVME - MOPC / GIZ. 2012. 35 p.

BRASIL. LEI Nº 9.478/1997. **Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências.**, Brasília, D.F., 6 ago 1997.

BRASIL. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. **Política Nacional de Resíduo Sólidos**, Brasília, DF., ago 2010.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Versão preliminar para consulta pública**. Ministerio do Meio Ambiente. Brasília, 2011. 102 p.

BRASIL. Instrução Normativa IBAMA nº 13. **Publicar a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos**, Brasília, D.F., 18 dez. 2012.

BRASIL. Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019. **Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010.**, Brasília, DF, abr 2019.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, Birmingham, v. 38, p. 68-94, mar 2012. ISSN : 0961-9534. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>>.

CARDOSO, M. T. **Regulação em aproveitamento energético de resíduos: proposições para o Brasil com base no estudo de caso sueco**. São Paulo, 2019. 242 p.

CEMIG. **Manual de arborização**. Belo Horizonte: Companhia Energética de Minas Gerais / Fundação Biodiversitas, 2011. 112 p.

CINTRA, T. C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. Piracicaba, 2009. 85 p.

CORTEZ, C. L. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: estudo de caso: AES Eletropaulo.** Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011. 246 p.

DAL FARRA, F. C. P. **Análise econômico-energética de utilização de resíduo industrial florestal para geração de energia térmica: um estudo de caso.** Botocatu, 2004. 57 p.

DEMIRBAS, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy Conversion and Management**, Trabzon, v. 42, n. 11, p. 1357-1378, jul 2001. ISSN: 0196-8904. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0)>.

DPC PROCESSOS TERMOQUÍMICOS. DPC Procesos termoquímicos, 2017. Disponível em: <<https://dpcbiomassa.com.br/dpc-2/el-proceso-dpc-resumen/?lang=es>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

EIGENHEER, E. M. **Lixo, Vanitas e Morte: considerações de um observador de resíduos.** Rio de Janeiro: Editora da Universidade Federal Fluminense, 2003. 196 p.

EIGENHEER, E.; FERREIRA, J. A.; ALDER, R. R. **Reciclagem: mito e realidade.** Rio de Janeiro: Folio, 2005. 120 p.

ESCOBAR, J. F. **A produção sustentável de biomassa florestal para energia no Brasil: o caso dos pellets de madeira.** SÃO PAULO, 2016. 122 p.

ESPAÑA. **Manuales de energías renovables 2. Energía de la biomasa.** Ministerio de Industria, Turismo y Comercio - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, 2007a. 134 p. (ISBN: 978-84-96680-15-9).

_____. **Energías renovables. Biomasa: Gasificación.** Ministerio de Industria, Turismo y Comercio - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, 2007b. 32 p. (ISBN-13: 978-84-96680-20-3).

ESPAÑA. **Biomasa: Industria.** Ministerio de Industria, Turismo y Comercio - Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, 2008. 39 p. (ISBN: 978-84-96680-31-9).

FAO. **Aprovechamiento forestal y residuos del aprovechamiento de la madera.** Roma, 2014. 29 p.

FAO. AQUASTAT. **Paraguay**, 2015. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/PRY/printesp1.stm>. Acesso em: 15 nov. 2019.

GARCÍA-GALINDO, D. et al. **Uso energético de biomasa de podas agrarias y renovación de plantaciones (PARP)**. Zaragoza, s.f. 49 p.

GRIPP, W. G. **Gerenciamento de resíduos sólidos municipais e os sistemas complexos: a busca da sustentabilidade e a proposta de cobrança da coleta em Santo André-SP**. São Carlos, 2004. 365 p.

HARGASSNER. NANO-PK PLUS. **La caldera compacta con condensación**, 2015a. Disponível em: <<https://www.hargassner.es/producto/nano-pk-plus/#ventajas>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

_____. **Caldera de pellets de alto rendimiento**, 2015b. Disponível em: <<https://www.hargassner.es/producto/classic/#ventajas2fb9-aea3>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

HARGASSNER. **Generación de electricidad y calor con biomasa**, 2016. Disponível em: <<https://www.hargassner.es/2016/07/11/generacion-de-electricidad-y-calor-con-biomasa/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

IP AGENCIA DE INFORMACIÓN PARAGUAYA. IP. **Paraguay pone a disposición en forma oficial datos de deforestación a nivel país**, 28 jun 2016. Disponível em: <<https://www.ip.gov.py/ip/paraguay-pone-a-disposicion-en-forma-oficial-datos-de-la-deforestacion-a-nivel-pais/>>. Acesso em: 17 nov. 2019.

JORDI SEGÚ, S.L. Jordi Segu. **Briquetas**, 2012. Disponível em: <<http://www.jordisegusl.es/briquetas/>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

LEITE, W. C. D. A. **Estudo da gestão de resíduos sólidos: uma proposta de modelo tomando a unidade de gerenciamento de recursos hídricos (UGRHI-5) como referência**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1997.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. Analysis of energy recovery potential using innovative technologies of waste gasification. **Waste Management**, Florencia, v. 32, n. (4), p. 640-652, abr 2012. PMID:21889326.

LOPES, A. A. **Estudo da gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos na bacia Tietê-Jacaré (UGRHI-13)**. São Carlos, 2007. 370 p.

MAEDA, E. E. **Diagnóstico da Gestão de Resíduos Sólidos nos municípios do Estado de São Paulo, a partir dos Planos Municipais de Gestão Integrada**. SÃO CARLOS, 2013. 160 p.

MAGALHÃES, E. A. **Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa**. VIÇOSA, 2007. 184 p.

MARTÍNEZ, S. O. C.; GONZÁLEZ, A. C. Arranque de un gasificador a nivel laboratorio utilizando residuos de poda. **Pistas Educativas, No. 130, noviembre 2018, México, Tecnológico Nacional de México en Celaya**, Celaya, v. 40, n. 130, p. 70-89, nov 2018. ISSN: 2448-847X.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**, Cheltenham, v. 83, n. 1, p. 47-54, may 2002. ISSN: 0960-8524.

MEIRA, A. M. D. **Gestão de resíduos da arborização urbana**. Piracicaba, 2010. 178 p.

MENDIBURU, F. L. Economía de la energía. Energía eólica, energía solar y otros tipos de energía. Ecología y reciclaje. **Energia electrica generada por la biomasa**, 2011. Disponível em: <<http://www.economiadelaenergia.com/2011/01/energia-electrica-biomasa/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

MIRANDA, M. A. D. S. **Potencial da biomassa florestal para produção de energia térmica industrial**. VIÇOSA, 2015. 60 p.

MMA. **Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado**. MMA – Ministério do Meio Ambiente. Projeto PNUD 00/20. Curitiba, 2009. 35 p.

MORATÓ, N. Biomasa, todo lo que debes de conocer de esta energía renovable, 2018. Disponível em: <<https://www.meteorologiaenred.com/biomasa.html>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

MOSCOSO, T. N. J. **Evaluación ambiental de alternativas tecnológicas de aprovechamiento energético de residuos forestales mediante análisis de ciclo de vida.** Universidad de Chile; Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas; Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología. Santiago de Chile, 2016. 93 p.

PANATEC POWER SOLUTIONS. ¿Qué es el pellet?, s.f. Disponível em: <<http://www.panatec-power.com/pellet-madera.php>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

PARAGUAY. **Análisis sectorial de residuos sólidos en Paraguay.** Secretaria Técnica de Planificación; Organización Panamericana de la Salud. Asunción, 2001. 246 p.

PARAGUAY. LEY 3.956/2009. **Gestión Integral de los Residuos Sólidos en la República del Paraguay,** Asunción, dic 2009.

PARAGUAY. DECRETO N° 6.092/2016. **Política Energética de la República del Paraguay,** Asunción, oct 2016a.

_____. **Atlas demográfico del Paraguay, 2012.** Fernando de la Mora: DIRECCIÓN GENERAL DE ESTADÍSTICAS, ENCUESTAS Y CENSOS, 2016b. 132 p.

_____. **Compendio estadístico ambiental del Paraguay, 2014.** DIRECCION GENERAL DE ENCUESTAS, ESTADÍSTICAS Y CENSOS; SECRETARIA TÉCNICA DE PLANIFICACIÓN. Fernando de la Mora, 2016c. 116 p.

PARAGUAY. Decreto 7.391. **Por el cual se reglamenta la ley n° 3956/2009, "gestión integral de los residuos sólidos en la república del Paraguay",** Asunción, 28 jun 2017.

PAVAN, M. D. C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil.** São Paulo, 2010. 186 p.

PHILIPPI, A. J.; AGUIAR, A. D. O. E. Residuos Sólidos: características e gerenciamento. In: PHILIPPI, A. J. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável.** 2a ed. ed. Barueri: Manole, v. 23, 2018. Cap. 10, p. 321-457.

PINCELLI, A. L. P. S. M. **Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética.** Piracicaba, 2011. 126 p.

PROVISIONA VERDE. ¿Qué son los pellet de madera?, 2017. Disponível em: <<http://www.provisionaverde.com/pellet.php>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

RINCÓN, S. **Sistemas Energéticos con Biomasa**. Grupo de Investigación en Biomasa y Optimización Térmica de Procesos – BIOT. Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Ingeniería. Bogotá, 2014. 53 p.

RODRÍGUEZ, B. I. R. Análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. **Boletín IIE**, Morelos, n. 3, p. 91-97 p., jul.- sep. 2003. Disponível em: <http://www.icesi.edu.co/blogs/mercadeosostenible2012_02/files/2012/10/ACV_MEDIO-AMBIENTE.pdf>. Acesso em: 21 oct. 2019.

SAE. **Diretrizes para a estruturação de uma Política Nacional de Florestas Plantadas**. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Brasília, 2011. 110 p.

SAMPAIO, R. P. **Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana**. São Carlos, 2014. 130 p.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, M. P. B. **Metodología de investigación**. 6ta. ed. México D.F.: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V., p. 1 - 20; 88 - 101. 2014.

SANTOS, N. M. D. **Gerenciamento integrado de resíduos sólidos: estudo de caso no instituto butantan**. São Paulo, 2015. 145 p.

SCHALCH, V. et al. **Resíduos sólidos: Conceitos, gestão e gerenciamento**. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2019. 579 p.

SILVA, D. P. D. **Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético: o caso do campus da usp na capital**. São Paulo, 2016. 124 p.

SOUTO, G. D. B.; POVINELLI, J. Resíduos Sólidos. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologias e gestão**. 2a. ed. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019. Cap. 22, p. 445-463.

STP. Plan nacional de desarrollo construyendo el Paraguay del 2030. **Residuos Sólidos**, 2018. Disponible em: <<http://www.stp.gov.py/pnd/ejes-estrategicos/diagnosticos/residuos-solidos/>>. Acceso em: 14 out. 2019.

SUGIMAT. Generación de gases, 2018a. Disponible em: <<https://www.sugimat.com/productos/generacion-de-gases/>>. Acceso em: 13 nov. 2019.

_____. Sistema ORC, 2018b. Disponible em: <<https://www.sugimat.com/productos/organic-rankine-cycle/>>. Acceso em: 13 nov. 2019.

TASCÓN, C. E. O.; URIBE, J. R. S.; VALENCIA, N. R. Evaluación de un gasificador de flujo descendente utilizando astillas de madera de café. **Cenicafé**, Manizales, v. 68, n. 2, p. 61-75, jul-dic 2017. ISSN: 0120-0275.

TRINIDAD, R. L. Agronoticias: revista para el desarrollo. **Tecnología: biocarbón con cáscara de castaña**, 31 jan. 2019. Disponible em: <<https://agronoticias.pe/ciencia-e-innovacion/tecnologia-biocarbon-con-cascara-de-castana/>>. Acceso em: 13 nov. 2019.

UASUF, A.; HILBERT, J. **El uso de la biomasa de origen forstal con destino a bionergía en la Argentina**. Buenos Aires, 2012. 50 p.

VALE, A. T.; SARMENTO, T. R.; ALMEIDA, A. N. Caracterização e uso de madeiras de galhos de árvores provenientes da arborização de Brasília, DF. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 4, p. 411-420, jun 2005.

VÁSQUEZ, M. C. R.; MUÑOZ, J. D. O. Material Science. **CALDERAS**, 2018. Disponible em: <<http://materialscience201801.blogspot.com/2018/05/calderas.html>>. Acceso em: 14 nov. 2019.

VILAR, O. M.; MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F. Resíduos Sólidos. In: ZUQUETTE, L. V. **Geotecnia Ambiental**. 1a. ed. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. Cap. 8, p. 215-260.

VMME; GIZ; UNIQUE WOOD. **Oferta y Demanda de Biomasa sólida en el Paraguay**. Viceministerio de Minas y Energía; GIZ; UNIQUE WOOD. San Lorenzo, p. 1-35. 2012.

VMME–MOPC. **Balance Energético Nacional 2017. En términos de energía final**. Asunción, 2018. 54 p.

VMME-MOPC; GIZ. **Evaluación de potenciales de energía renovable en Paraguay, estudio de cuatro casos.** Asunción, 2013a. 45 p.

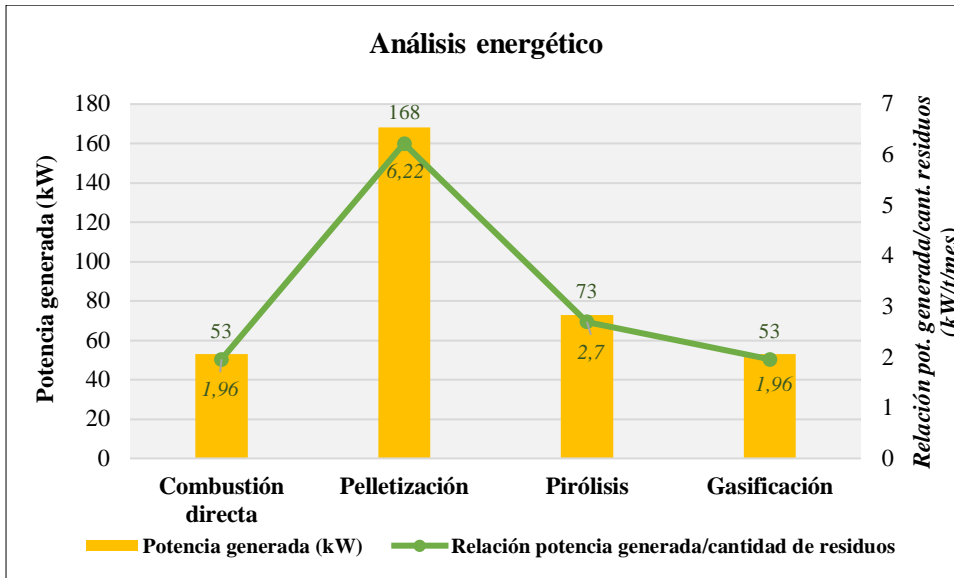
_____. **Producción y consumo de biomasa sólida en Paraguay.** Asunción: Alamo S. A., 2013b. 50 p.

WIECHTECK, M. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos - Sumário Executivo - Revisão 00.** Ministério do Meio Ambiente - Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental - Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Curitiba, 2009. 41 p.

APÉNDICES

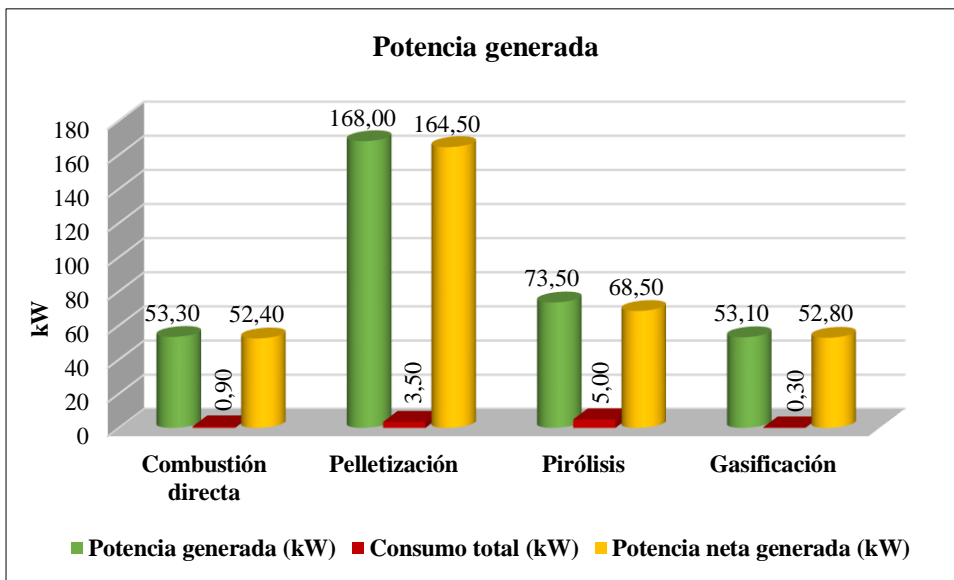
Apéndice A – Figuras de resultados de evaluaciones de tecnologías.

Figura 21. Potencia generada con cada tecnología.



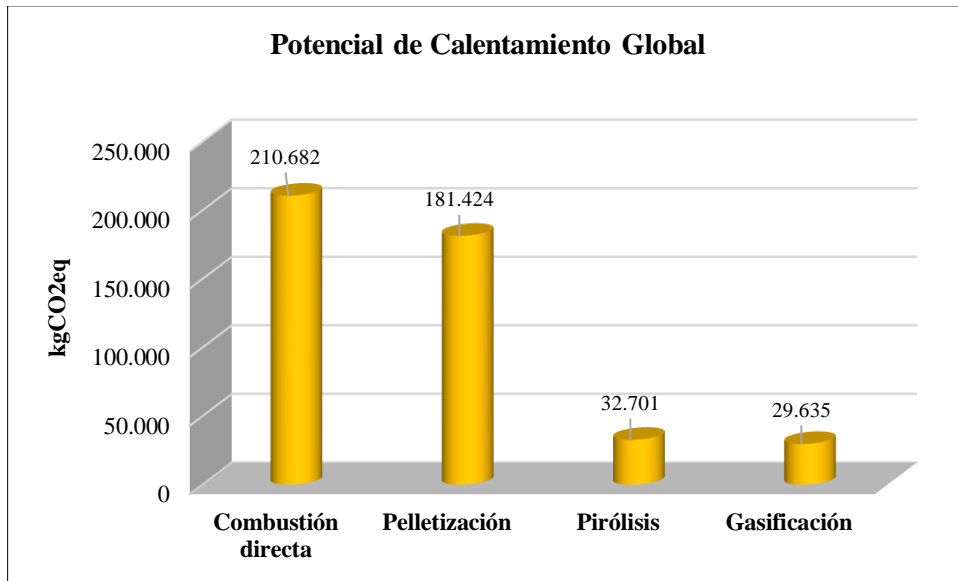
Fuente: elaboración del autor en base a datos de Moscoso, 2016.

Figura 22. Resumen de potencia generada y consumida por cada alternativa.



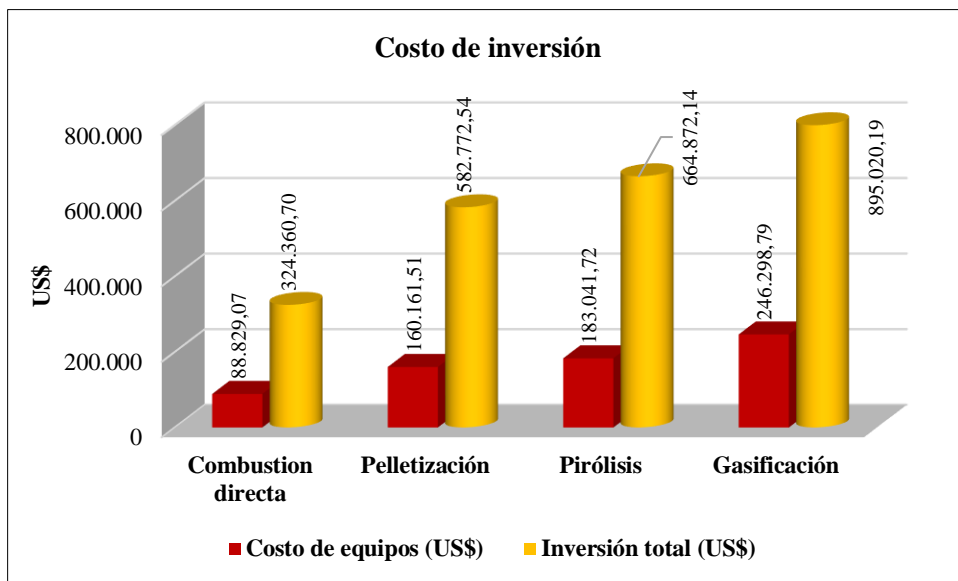
Fuente: elaboración del autor en base a datos de Moscoso, 2016.

Figura 23. Análisis del PCG de las tecnologías.



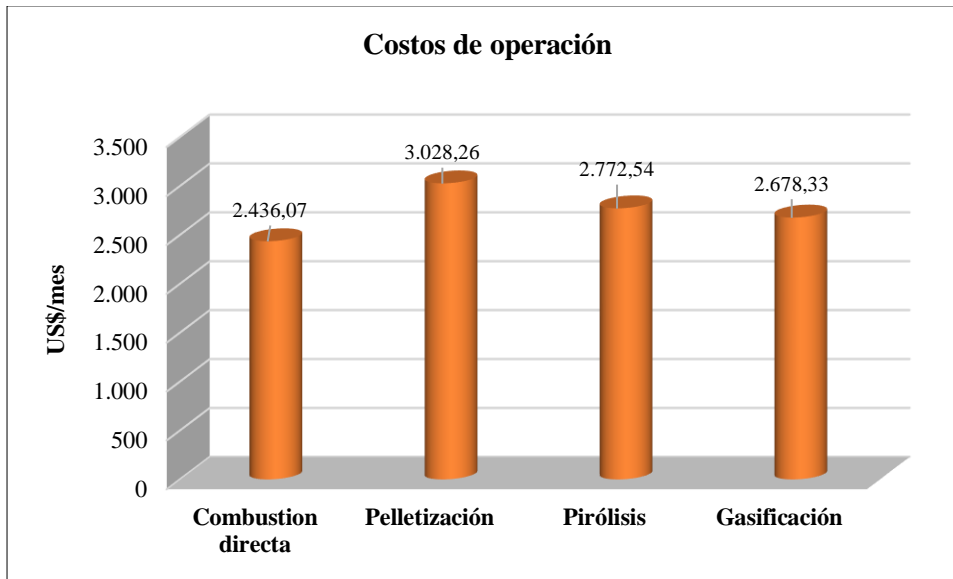
Fuente: elaboración del autor en base a datos de Moscoso, 2016.

Figura 24. Costos de inversión total y de equipos para cada tecnología.



Fuente: elaboración del autor en base a datos de Moscoso, 2016.

Figura 25. Costos de operación mensual para cada tecnología.

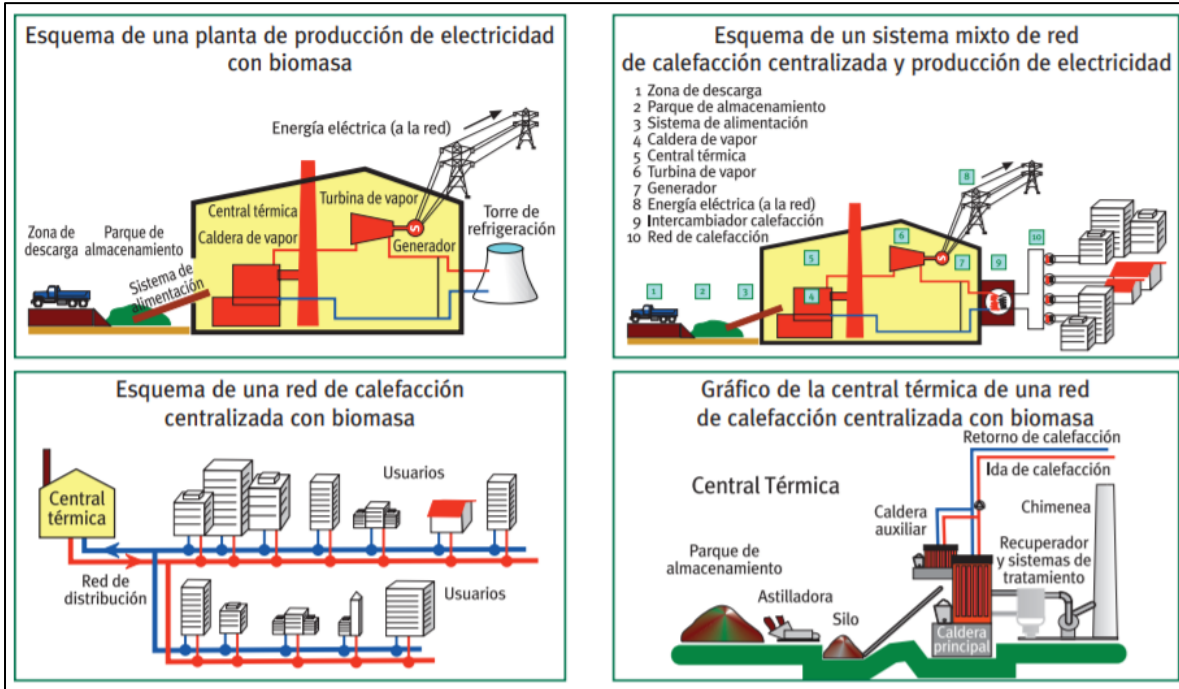


Fuente: elaboración del autor en base a datos de Moscoso, 2016.

ANEXOS

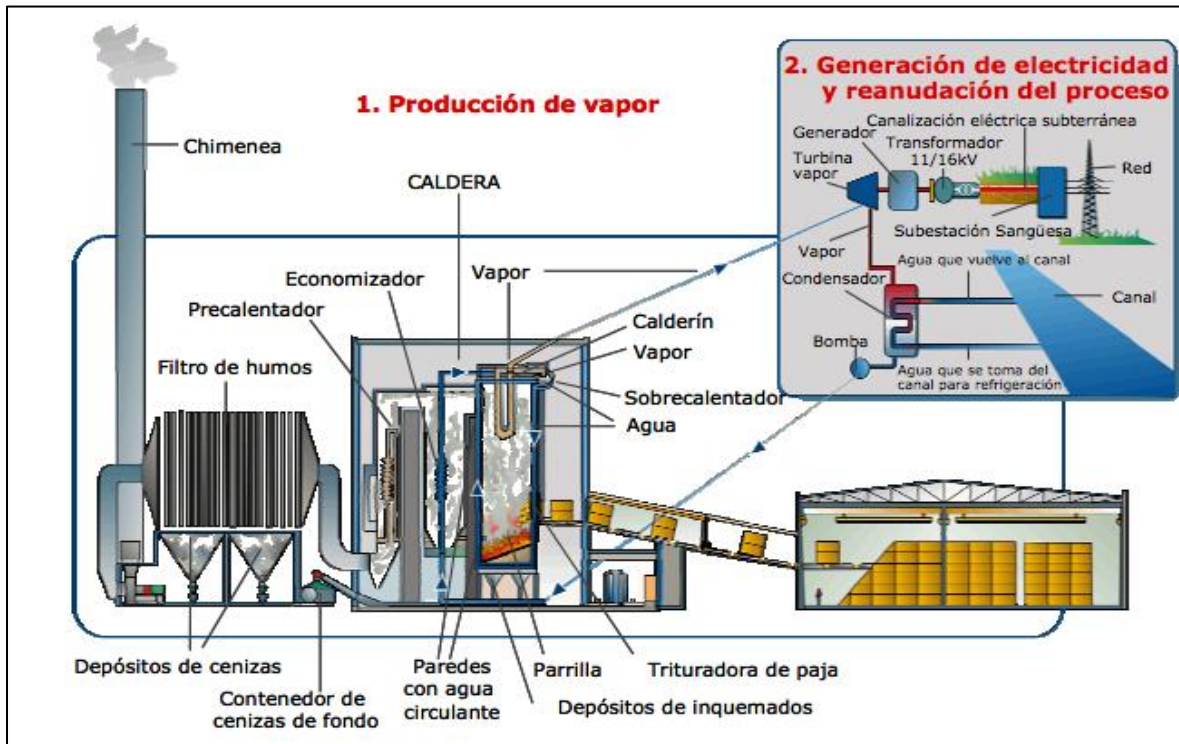
Anexo A – Figuras complementarias de las tecnologías de aprovechamiento energético.

Figura 26. Energía originada del aprovechamiento de la biomasa.



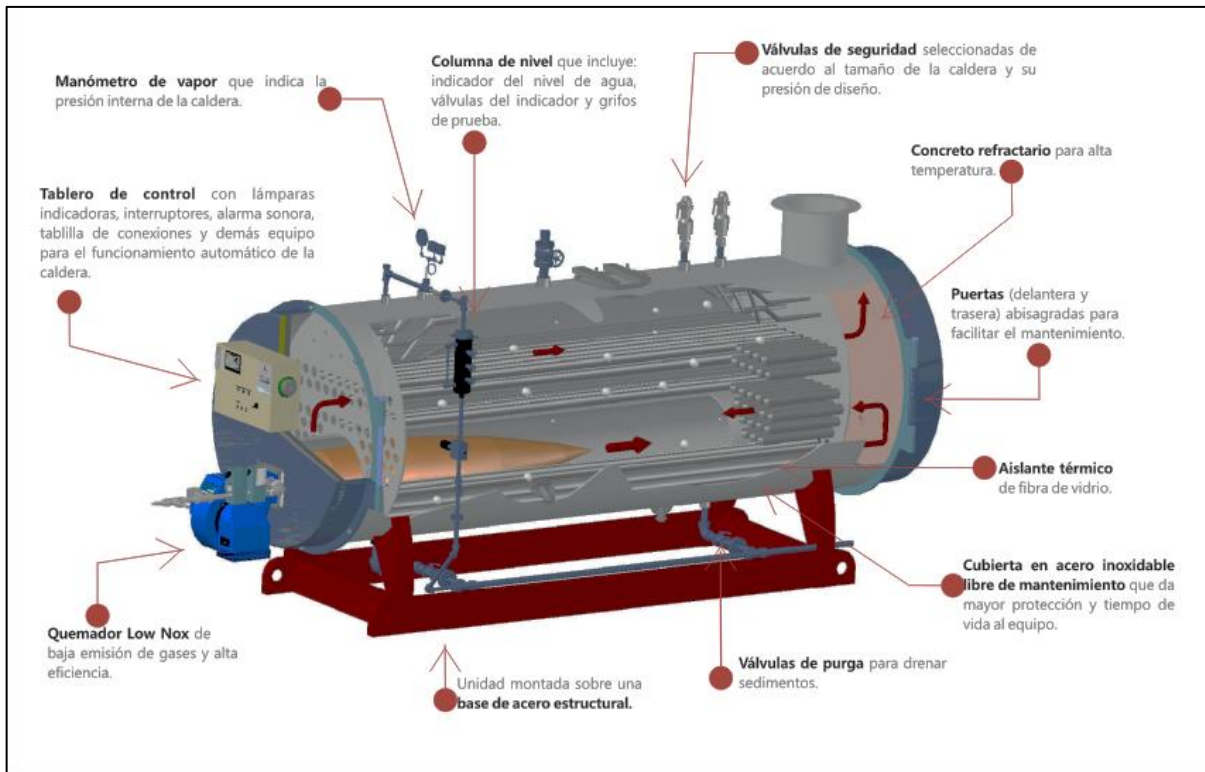
Fuente: España, 2007a.

Figura 27. Central termoeléctrica de biomasa.



Fuente: Mendiburu, 2011.

Figura 28. Calderas de generación de energía para plantas termoeléctricas.



Fuente: Vásquez & Muñoz, 2018.

Figura 29. Unidad de generación eléctrica GEK 20 kWe (potencia real), a partir de astillas de madera.



Fuente: Tascón, Uribe & Valencia, 2017.

Figura 30. Generador de gases calientes: cámara de combustión junto con una cámara de dilución.



Fuente: Sugimat, 2018a.

Figura 31. Gasificador de biomasa con unidad de generación eléctrica acoplada.



Fuente: Rincón, 2014.

Figura 32. Modelo de gasificador de biomasa con unidad generadora de electricidad incorporada.



Fuente: Rincón, 2014. Rincón, 2014.

Figura 33. Planta de generación de electricidad con gasificación integrada de biomasa.



Fuente: Rincón, 2014.

Figura 34. Incinerador de pellets de madera.



Fuente: Provisiona verde, 2017.

Figura 35. Prototipo de estufa de pellets con tecnología de micro cogeneración.



Fuente: Bioenergy international, 2017.