

Proceso de conversión de biomasa forestal en energía mediante gasificación

ISBN 978-9942-679-11-6



Lenín Santiago Orozco Cantos
José Omar Cabrera Escobar
Sayuri Monserrath Bonilla Novillo

CIDE
EDITORIAL



Proceso de conversión de biomasa forestal en energía mediante gasificación



UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
CHIMBORAZO

Unach
en movimiento



Proceso de conversión de biomasa forestal en energía mediante gasificación

Autores



Lenin Santiago Orozco Cantos

José Omar Cabrera Escobar

© Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH)

Sayuri Monserrath Bonilla Novillo

© Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)

Proceso de conversión de biomasa forestal en energía mediante gasificación

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquiera otro, sin la autorización previa por escrito al Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador (CIDE).

Copyright © 2024
Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador
Tel.: + (593) 04 2037524
<http://www.cidecuador.org>

ISBN: 978-9942-679-11-6
<https://doi.org/10.33996/cide.ecuador.PC2679116>



Filiación:

Lenin Santiago Orozco Cantos
José Omar Cabrera Escobar
Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH)



Sayuri Monserrath Bonilla Novillo
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)

Dirección editorial: Lic. Pedro Misacc Naranjo, Msc.
Coordinación técnica: Lic. María J. Delgado
Diseño gráfico: Lic. Danissa Colmenares
Diagramación: Lic. Alba Gil
Fecha de publicación: noviembre, 2024



La presente obra fue evaluada por pares académicos experimentados en el área.

Catalogación en la Fuente

Proceso de conversión de biomasa forestal en energía mediante gasificación / Lenin Santiago Orozco Cantos, José Omar Cabrera Escobar y Sayuri Monserrath Bonilla Novillo.- Ecuador: Editorial CIDE, 2024.

239 p.: incluye tablas, figuras; 17,6 x 25 cm.

ISBN: 978-9942-679-11-6

1. Biomasa forestal 2. Gasificación

Semblanza de los autores

Lenin Santiago Orozco Cantos

<https://orcid.org/0000-0003-4202-3633>

lenin.orozco@unach.edu.ec



Ingeniero Mecánico (ESPOCH) y magister en Eficiencia Energética (EPN) con experiencia en el sector petrolero y desempeño docente para la UTPL en calidad de profesor evaluador. Docente en la Facultad de Mecánica ESPOCH con participación en proyectos de Eficiencia Energética y energías renovables como eólica, solar y uso de recursos hídricos. Docente en la Facultad de Ingeniería en la UNACH, carrera de Ing. Ambiental, con tutorías de tesis de pregrado y postgrado en Análisis y diseño de sistemas energéticos sostenibles.

José Omar Cabrera Escobar

<https://orcid.org/0000-0002-0197-5163>

omar.cabrera@unach.edu.ec



Ingeniero mecánico, magister en diseño mecánico, magister en ingeniería matemática y computación, doctor en avances de ingeniería de materiales y energías sostenibles, docente investigador de pregrado de la Universidad Nacional de Chimborazo y docente en la escuela de posgrado de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Sayuri Monserrath Bonilla Novillo

<https://orcid.org/0000-0001-6509-8238>

smbonilla@esPOCH.edu.ec



Ingeniera Mecánica (ESPOCH-2013), Magíster en Matemática mención Modelación y Docencia (ESPOCH-2022), y Magister en Gestión Industrial y Sistemas Productivos (ESPOCH-2016). Docente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, se ha desempeñado también como técnica docente de la Unidad de Admisión y Nivelación, así como docente de la Facultad de Administración de Empresas. Ha trabajado como coordinadora del área de Mantenimiento de la Unidad Oncológica SOLCA de Chimborazo. Se ha desempeñado como capacitadora en distintos programas de formación académica y profesional. Ha escrito obras de relevancia y artículos científicos en calidad de autora y coautora relacionados a las áreas de ingeniería mecánica, ingeniería industrial y las ciencias exactas. Ha participado en cursos, talleres, seminarios y ha realizado ponencias dentro del ámbito nacional e internacional.

Dedicatoria

Dedicamos este libro a todos aquellos que, con su trabajo y pasión, buscan transformar el mundo a través de soluciones sostenibles e innovadoras.

A nuestras familias, por ser nuestra inspiración constante.

Y, especialmente, a las futuras generaciones estudiantes, investigadores y profesionales que continuarán explorando los caminos de la tecnología en busca de un futuro más limpio y responsable.

Los Autores.

Agradecimiento

Esta obra es el resultado de un esfuerzo conjunto, apoyo y la colaboración profesional de muchas personas e instituciones.

En primer lugar, expresamos nuestra gratitud a nuestras familias, quienes con su paciencia, comprensión y amor incondicional nos motivaron a seguir adelante en este proyecto. Su apoyo constante fue el pilar sobre el cual construimos este trabajo.

Agradecemos profundamente a nuestras instituciones académicas y científicas, que nos brindaron el entorno necesario para desarrollar esta investigación. En especial, reconocemos a nuestros colegas y mentores, cuyos valiosos comentarios y sugerencias enriquecieron nuestro enfoque y fortalecieron nuestra perspectiva.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a nuestros lectores, quienes con su interés y dedicación hacen que este esfuerzo tenga sentido. Este libro es para ustedes, con el ánimo de inspirar nuevas ideas, proyectos y soluciones en el fascinante campo de la conversión de biomasa y energía alternativa.

Los Autores

Índice

Semblanza de los autores	5
Dedicatoria	8
Agradecimiento	9
Glosario de términos	13
Resumen	16
Prólogo	17
Introducción	20

Capítulo 1 **Energía alternativa y sus modelos de producción desde la biomasa**

1.1 Las energías alternativas y sus potencialidades	24
1.2 Qué es la biomasa, y sus derivados	36
1.1.1. Clasificación de la biomasa	38
1.2. La energía contenida en la biomasa forestal	44
1.2.1. Qué es la gasificación y cómo funciona	46
1.2.2. Procedimiento de gasificación y sus teóricos ..	50
1.2.3. Clasificación de los gasificadores	53
1.3. Ventajas de la gasificación sobre la combustión	61
1.4. Biomasa forestal una fuente de energía renovable y amigable con medio ambiente	63
Conclusiones del capítulo	68

Capítulo 2

Modelo para el levantamiento del potencial de biomasa, caso de estudio Riobamba

2. Levantamiento de la información	74
2.1. Parámetros del potencial energético de biomasa residual de industria maderera del Riobamba	75
2.2. Acerca del proceso de encuesta	87
2.3. Equipo de gasificación utilizado	89
2.4. Procedimiento para la determinación de la cantidad de energía obtenida por unidad de biomasa dispuesta	98
2.4.1. Materiales y equipos utilizados	98
2.4.2. Diagrama P&ID del gasificador downdraft ..	100
2.4.3. Protocolo de uso y experimentación del gasificador	102
2.5. Balance de masa y energía en la gasificación	108
2.6. Eficiencia del proceso de gasificación	113
Conclusiones del capítulo	115

Capítulo 3 Posibilidades y retos del proyecto

3. Factores a considerar para el levantamiento de información.....	117
3.1. Derivaciones	118
3.1.1. Información de los establecimientos encontrados	118
3.1.2. Cantidad y tipo de materia prima presente	121

en cada uno de los establecimientos madereros .	
3.1.3. Cantidad y tipo de residuos forestales de la industria maderera	130
3.1.4. Destino final de los residuos forestales de industria maderera	139
3.1.5. Implicación económica de los residuos forestales de industria maderera para los establecimientos	144
3.1.6. Cantidad de residuos forestales disponibles para uso energético	156
3.1.7. Cálculo de energía aprovechable desde la biomasa residual	165
3.2. Conjeturas sobre el caso de estudio	189
3.2.1. Comparación de valores de otros estudios similares	189
3.2.2. Análisis financiero gasificador actual	191
3.2.3. Viabilidad en la implementación de una planta piloto	209
3.3 Conclusiones del capítulo y generales	213
3.4 Observaciones post investigación para tener presente	216
Referencias bibliográficas	219
Anexos	228



Glosario de términos

Biomasa	Cantidad total de materia viva presente en un ecosistema obtenida generalmente por fotosíntesis y susceptible de ser transformada en combustible útil.
Energía renovable	Energía que utiliza los recursos inagotables de la naturaleza como la biomasa, las radiaciones solares o el viento.
Matriz energética	Representación cuantitativa de toda la energía disponible en un determinado territorio, región, país, o continente; para ser utilizada en los diversos procesos productivos.
Poder calorífico	Cantidad de energía por unidad de masa o de volumen de materia que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación.
Syngas	Gas de síntesis, es un combustible gaseoso obtenido a partir de sustancias ricas en carbono.
Cadena trófica	Proceso de transferencia de energía alimenticia a través de una serie de organismos, en el que cada uno se alimenta del precedente y es alimento del siguiente.

Actividad silvícola	Conjunto de actividades relacionadas con el cultivo, el cuidado y la explotación de los bosques y los montes.
Energía embebida	Cantidad de energía que en su momento se usó para fabricar un cierto producto.
Tocón	Parte del tronco de un árbol que queda unida a la raíz cuando lo cortan por el pie.
Densidad poblacional	Relación que hay entre la cantidad de personas que viven en un territorio y la superficie de éste.
Trozos	Tronco aserrado por los extremos para obtener tablas.
Madera en rollo	También llamada rolliza, son los troncos de los árboles apeados que se desraman, se separan de la copa, y posteriormente se cortan a unas dimensiones normalizadas.
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
EPN	Escuela Politécnica Nacional.
EIA	Administración de Información de la Energía de los Estados Unidos.
ALC	América Latina y el Caribe.
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía.
BEP	Barril equivalente de petróleo.
ERNC	Energías renovables no convencionales.

GICC	Gasificación integrada en ciclo combinado.
GEI	Gases de efecto invernadero.
MDF	Tablero de fibras de densidad media.
MDP	Tablero de partículas de densidad media.

Resumen

En el presente libro hablaremos de la biomasa forestal residual del sector maderero y su aprovechamiento para uso energético, como caso de estudio se tendrá como ejemplo una zona del Ecuador conocido como Riobamba por su potencial para la creación de este modelo energético residual, que aprovecha la cantidad total de materia orgánica disponible, en este caso, la materia viva disponible es de origen vegetal. El aprovechamiento se hace a través de la transformación de biomasa en combustible gaseoso por un proceso de gasificación denominado downdraft, que se utiliza para obtener un gas con bajo contenido de impurezas y alquitrán, además de una gran disponibilidad energética del gas obtenido. Los estudios realizados arrojaron que hay una disponibilidad de aproximadamente de poco más de 61 toneladas de biomasa forestal, del cual se puede disponer el 17% para lograr una producción de 39 mega watt por hora; por otro lado, podemos indicar que el gas resultante está dentro de los parámetros teóricos de producción y que su costo de producción es más económico que el gas licuado proveniente del petróleo.

Biomasa forestal, gasificación downdraft, uso energético.

Prólogo

El libro que se nos presenta a continuación representa el estudio aplicado en el cantón de Riobamba seleccionado por su actividad forestal y además con ventaja estratégica para la disposición de residuos de la industria maderera para la generación de energía, es un aprovechamiento cercano al 40% de los desperdicios de la tala y el aserrado, en una forma de energía mejor conocida como bioenergía o biomasa, es un interesante viaje a través de definiciones teóricas y factibilidades técnicas por medio de las cuales se visualiza la preeminencia de la zona para la producción de energía a partir del residual de la explotación maderera.

En este sentido, se mostrará el levantamiento de información de la cantidad de biomasa residual forestal generada en todo el cantón Riobamba, tomando en cuenta parroquias urbanas como rurales, identificando y cuantificando las especies que generan esta biomasa, así como también el tipo de residuo: aserrín, viruta, madera trozada y corteza. Se estima la cantidad de energía aprovechable de esta biomasa bajo la utilización de un gasificador de tipo downdraft el mismo

que cuenta con un sistema básico de acondicionamiento del syngas producido.

De igual manera, se evalúa económicamente la viabilidad de utilización de este recurso y tecnología como una fuente de energía alternativa en el entorno social de la localidad en tratamiento. La biomasa de madera es una fuente renovable y neutra de CO₂, que si se utiliza de una manera sostenible y eficiente puede contribuir a un medio ambiente más limpio.

Mediante la fotosíntesis, los bosques deben absorber CO₂ del ambiente y luego lo fijan en las plantas como carbono y liberan oxígeno a la atmósfera. La explotación de madera con fines industriales genera variedad de residuos o desechos, estos pueden ser combustionados directamente o entrar en un proceso de gasificación, en cualquiera de los dos casos, su utilización genera CO₂ al medio ambiente por su proceso de quemado. Este dióxido de carbono es captado nuevamente por los bosques en crecimiento y aquellos que han sido generados por reforestación.

Este es un trabajo original que permite destinar recursos que se creen perdidos en los desperdicios en un beneficio energético para la región estudiada, además de generar fuentes de ingreso y empleo alrededor de una industria creciente como la bioenergía; los resultados obtenidos son realmente alentadores de una operación en mayores dimensiones y de

manera sustentable, a parte de sostenible en el tiempo, lo que puede redundar en beneficios para la región.

La experiencia obtenida en este libro puede fácilmente ser extrapolada a otras regiones.

Introducción

En la mayoría de los países del continente americano, debido a la práctica agrícola y forestal por tradición deja muchos excedentes de residuos de la misma naturaleza, los cuales son una fuente interesante de energía renovable que ofrece una poderosa alternativa al petróleo, es por ello que la denominada bioenergía debe su nombre a la disponibilidad de energía proveniente de la biomasa, y tiene como intención obtener energía procedente de procesos biológicos lo cual ayuda con el tratamiento de los desechos; pudiendo decir que la basura de algunos termina siendo el tesoro de otros, es un aprovechamiento en el caso de los desechos vegetales de toda la energía que absorbieron del sol y acumularon a nivel celular a través del proceso de la fotosíntesis.

En el caso particular de estudio, en este libro se trazarán en el Ecuador como país, las posibilidades de aplicación de la biomasa de origen forestal; en la actualidad los datos apuntan a una dependencia superior al 90% de consumo total de energía proveniente de los combustibles fósiles, lo cual económicamente representa fuertes gastos debido al consumo total de energía, estudios como este apunta a generar una

diversificación de las fuentes eléctricas y a un importante ahorro del gasto nacional en el rubro energético. Hoy día al menos del 8% de la producción energética nacional entre fuentes hidroeléctricas y un incipiente uso de la biomasa como lo indican entidades gubernamentales.

Un ejemplo particular en el Ecuador, del cual podemos hacer referencia, lo representa la región de Riobamba en la que una de las actividades económicas fundamentales está orientada a la producción maderera, haciéndola interesante por la cantidad de desperdicio asociado a la actividad económica, además que las especies manejadas son de una calidad alta desde el punto de vista del poder calorífico y su velocidad de renovación como cultivo. Ahora la zona consta de procesos artesanales y procesos industrializados; en el caso artesanal se resuelve el problema de los desechos al igual que los sobrantes industriales que por el aprovechamiento máximo, minimiza la cantidad de desechos, pero igualmente deja una cantidad aprovechable de estos.

Con el apoyo de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, específicamente de su Facultad de Ingeniería Mecánica quienes poseen un gasificador con fines académicos, con las características necesarias que sea un gas adecuado para la generación de energía y cumpla con el protocolo Downdraft, este apoyo resulta de crucial importancia para

obtener valores reales de aprovechamiento de la biomasa, y así cuantificar la cantidad de gas producido en proporción a cantidad consumida de biomasa forestal. La idea es replicar el proceso de manera que se pueda desarrollar en la geografía del país. Esperamos dejar la evidencia clara de que la biomasa forestal es una fuente sostenible de energía eléctrica y térmica, y un sustituto ideal para el petróleo que ha sido la fuente de energía por excelencia de consumo domiciliario e industrial.

Por lo tanto, el cuestionamiento central de este libro y que esperamos responder en el desarrollo del mismo, es la visualización el potencial energético disponible en la biomasa forestal, presente en los residuos de la industria maderera en la región Riobamba y posibilidad de utilizarla en el proceso de gasificación tipo downdraft. Pueden surgir escenarios específicos a evaluar: Cuantificación y disponibilidad la biomasa forestal de la industria maderera disponible en Riobamba, Caracterizar el gas producido en el gasificador de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En la tercera etapa se Calcula la cantidad de energía aprovechable a partir de biomasa forestal residual. Por ultimo revisar el modelo financiero asociado a la utilidad de la biomasa forestal residual esperando que se pueda implementar de una planta piloto en la región.

Capítulo 1

Energía alternativa y sus modelos de
producción desde la biomasa



Energía alternativa y sus modelos de producción desde la biomasa

En esta primera sección del libro enunciaremos aspectos de la energía y sus modelos de producción haciendo hincapié en el elemento teórico necesario en torno a la evaluación energética de recursos renovables y los métodos requeridos para su disposición, apalancado en la información existente tanto nacional como de estudio y mundial.

1.1 Las energías alternativas y sus potencialidades

Es lugar común hablar de un mundo cada vez más poblado, más contaminado por la acción antrópica y por el uso de los combustibles fósiles, es decir nuestro mundo está acusando los abusos por los excesos energéticos de la vida moderna, la movilidad automotora, la electricidad generadas en termoeléctricas alimentadas con gas GLP o cualquier otro derivado de crudo, que desde 1859 año marcado por el

nacimiento de la industria petrolera moderna hasta la actualidad es por antonomasia la empresa energética que mueve el mundo, con sus consabidas consecuencias y efectos sobre el ambiente. Muy a pesar del dominio que ha demostrado el petróleo como fuente energética primordial para la supervivencia de la humanidad en las condiciones de la modernidad y comodidad, las crisis energéticas mundiales y las hostilidades bélicas generadas por la tenencia del oro negro, y la certeza de que es un recurso no renovable han generados movimientos alternativos energéticos interesantes.

Recordemos momentáneamente los tipos de energía de los que tenemos conocimiento, a groso modo tenemos energía química que es extraída de los combustibles fósiles principalmente, o de reacciones nucleares sin embargo a este tipo de energía química le aprendimos a llamar energía nuclear, tenemos energías que aprovechan los potenciales hidráulicos en embalses o corrientes de agua dulce caudalosas, y así podemos hablar de los movimientos de las masas de aire o de las mareas. Cada una de las energías nombradas plantean una alternativa al petróleo y una posibilidad de energía limpia y renovable.

El término renovable se asocia a la energía que puede ser producida o se deriva de una fuente que es inagotable en esencia, como el viento, el caudal de los ríos, las mareas, es

decir su disponibilidad se renueva constantemente y de forma indefinida, además de ser sostenibles en el tiempo parafraseando al ministerio de electricidad y energía renovable en su atlas bioenergético del Ecuador publicado en el 2014. Se espera que estos modelos de energía renovables vayan sustituyendo paulatinamente la hegemonía del petróleo en el mercado energético.

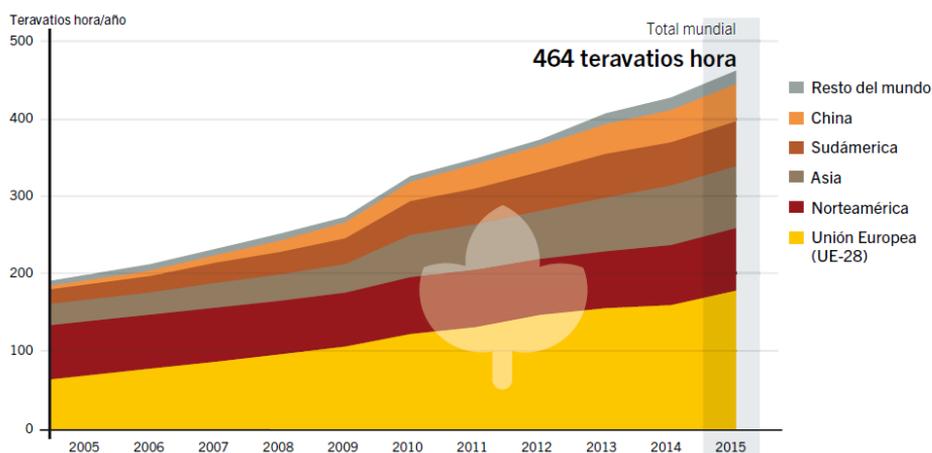
Las energías alternativas y sus potencialidades Agencia Internacional de Energía conocida por sus siglas en inglés y francés como (IEA) indican que el crecimiento de las energías renovables se espera que sea alrededor de 1,9% anual en las próximas décadas. Además, que los países más interesados en lograr una independencia del petróleo son los más industrializados, estos muestran mayores intereses en lograr energías limpias y renovables, mucho más que los países que aun en pleno siglo 21 se encuentran en vías de desarrollo, datos aportados por la Organización de las Naciones Unidas, en su boletín para la Agricultura y la Alimentación FAO (2008)

Ahora bien, nuestro interés lo orientaremos en este texto hacia la biomasa como energía renovable, en el gráfico presentado a continuación en la Figura 1, indica la tendencia mundial en el uso de este modelo de energía renovable, a pesar que tecnológicamente hablando, ha enfrentado dificultad para su desarrollo por el descenso de los precios del petróleo desde

el año 2015, al bajo costo del petróleo y las implicaciones de construir biodigestores para el uso de la biomasa, convierten a estos proyectos en quimeras.

Figura 1

Generación mundial de Bio-energía, por país y región, 2005–2015.



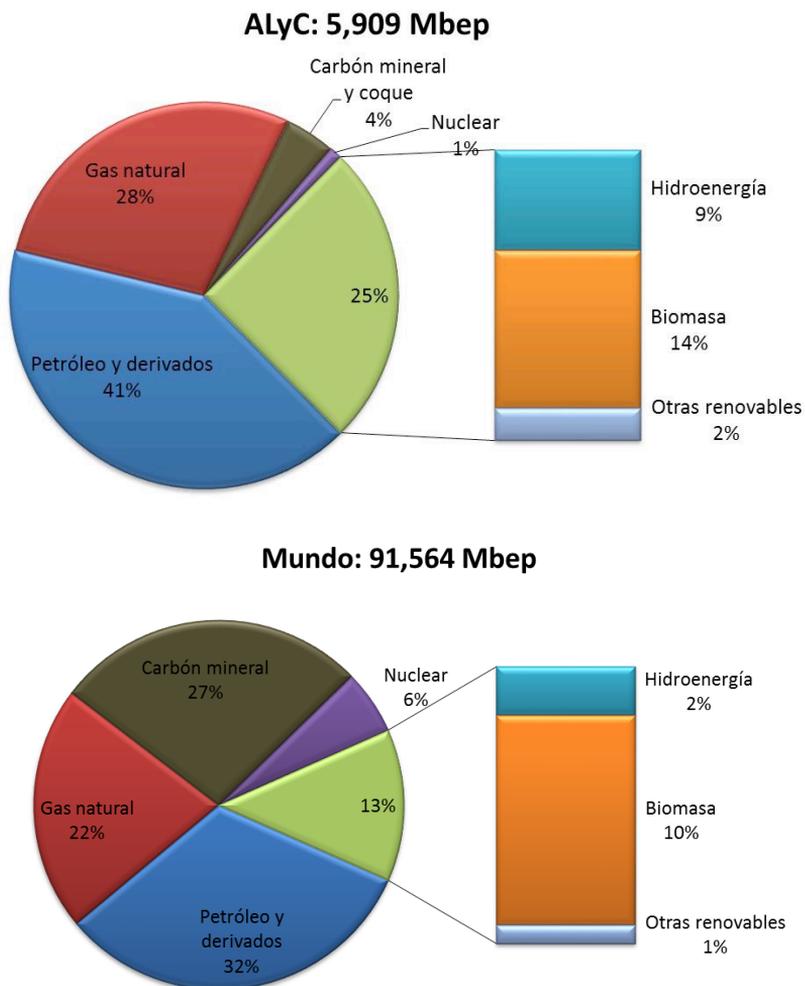
Nota. Adaptado de Renewable Energy Policy Network for the 21st Century REN 21, 2016.

En la Figura 2, pese al hecho que los países industrializados son los pioneros en el uso y el incremento del uso de las energías alternativas, Latinoamérica y los países del Caribe han demostrado un uso mayor desde el punto de vista porcentual medido en millones de barriles equivalentes de petróleo; observemos con detenimiento como los países suramericanos y caribeños tienen un 25% de su consumo

energético asociado a fuentes naturales como la hídrica, eólica, solar y biomasa, siendo esta última la más importante desde el punto de vista de aportes en un 14% de ese 25 porcentual aportado por las energías alternativas.

Figura 2

Matriz energética ALC vs Mundo.



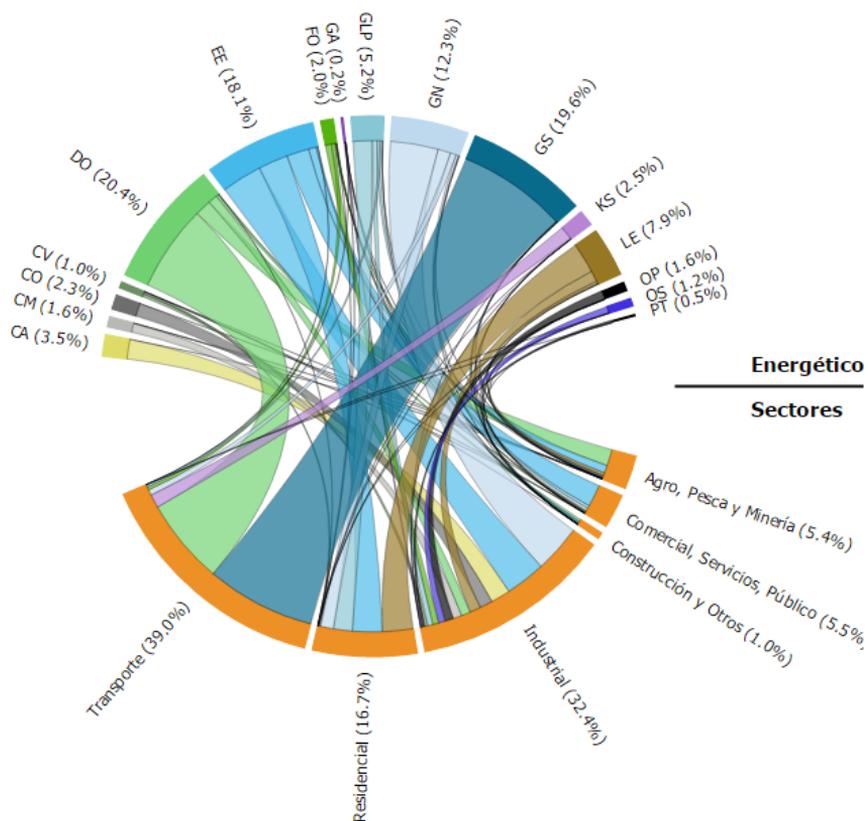
Nota. Adaptado de Organización Latinoamericana de Energía OLADE, 2014.

Actualmente, las energías renovables se han establecido en todo el mundo como una importante fuente de energía. Su rápido crecimiento, particularmente en el sector eléctrico es impulsado por diversos factores, incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables; iniciativas de política aplicada; un mejor acceso al financiamiento; seguridad energética y cuestiones de medio ambiente; demanda creciente de energía en economías en desarrollo y emergentes y, la necesidad de acceso a una energía modernizada. En consecuencia, los países en desarrollo presentan surgimiento de mercados nuevos tanto para la energía renovable centralizada como para la distribuida. (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century REN 21, 2016)

La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), indica que los energéticos de biomasa como son la leña y la caña de azúcar son utilizados específicamente para el sector residencial y para el sector industrial. La caña de azúcar tiene una marcada exclusividad de uso en el sector industrial, mientras que la leña, el 68% sirve al sector residencial y todo lo demás al sector industrial esto se puede observar en la Figura 3.

Figura 3

Participación del consumo por energético y sectores: América Latina y El Caribe – 2015.



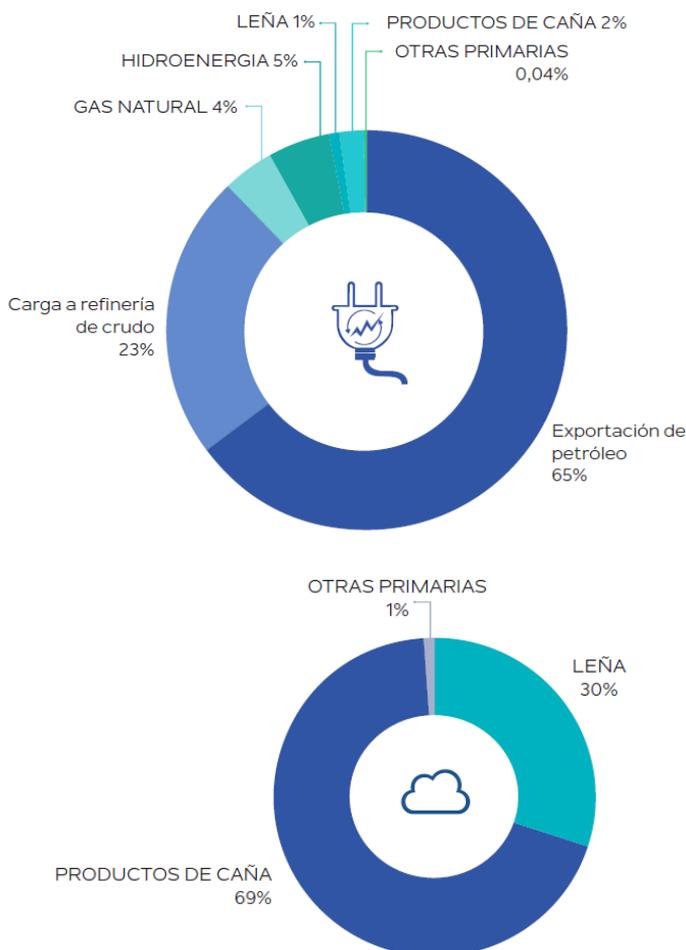
CA	Caña de Azúcar y Derivados	CM	Carbón Mineral	CO	Coque	CV	Carbón Vegetal
DO	Diesel Oil	EE	Electricidad	FO	Fuel Oil	GA	Gases
GLP	Gas Licuado	GN	Gas Natural	GS	Gasolina/Alcohol	KS	Kerosene/Jet fuel
LE	Leña	OP	Otros Primarias	OS	Otras Secundarias	PT	Petróleo

Nota. Adaptado de <http://www.olade.org/>

Como el caso de estudio que presentamos está asociado a la región de Riobamba de Ecuador, realizaremos referencia al balance energético de la nación ecuatorial publicado para el año 2016 en base a la producción total bruta durante el 2015, la cual fue de 225 millones de barriles equivalentes de petróleo, y el porcentaje aportado por las energías alternativas fue del 8% y este ocho porcentual se compone de un 3% (6,75 millones de BEP) proveniente de la biomasa y el 5% restante de la fuerzas hídricas (11,25 millones de BEP). En la Figura 4, se puede observar con mayor detalle los porcentajes de producción energética y el claro 8% descrito con anterioridad.

Figura 4

Producción de energía primaria 2015.



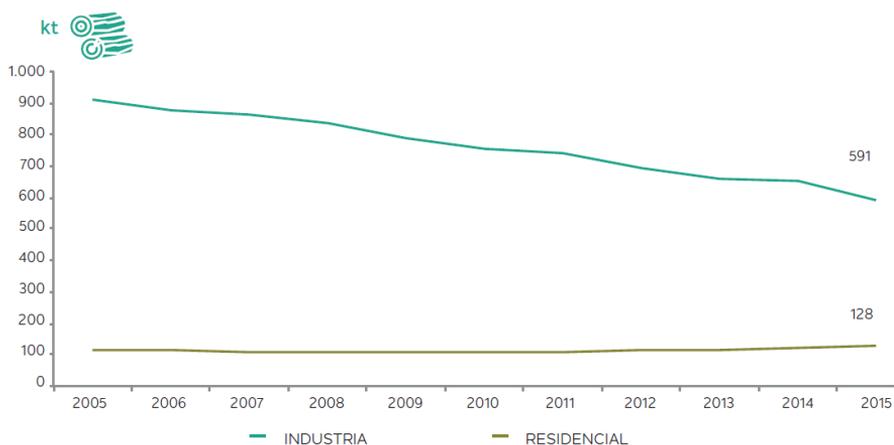
Nota. Adaptado de Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016.

En Ecuador, se distribuyen a los siguientes sectores, los productos energéticos, el industrial, centrales eléctricas y residencial, algo muy similar a lo que ocurre en América Latina y el Caribe. Por ejemplo, es una constante de la zona que la

leña es destinada al sector residencial (84%) y los productos residuales de caña de azúcar se dividen en modo equivalente para el uso directo en el sector industrial como para las centrales eléctricas como se aprecia en las Figuras 5 y 6.

Figura 5

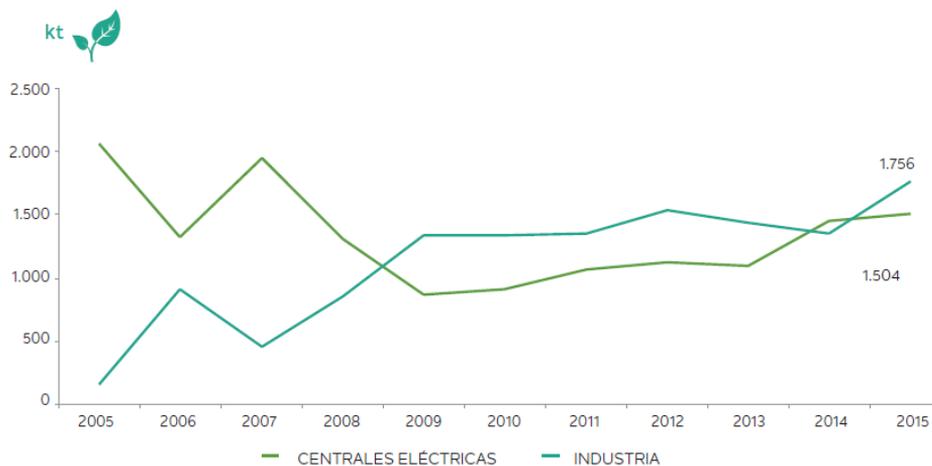
Oferta y demanda de leña en Ecuador 2016.



Nota. Adaptado de Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016.

Figura 6

Oferta y demanda de productos de caña Ecuador 2016.

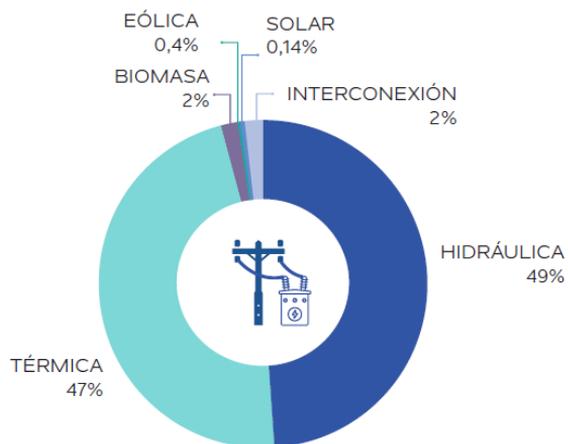
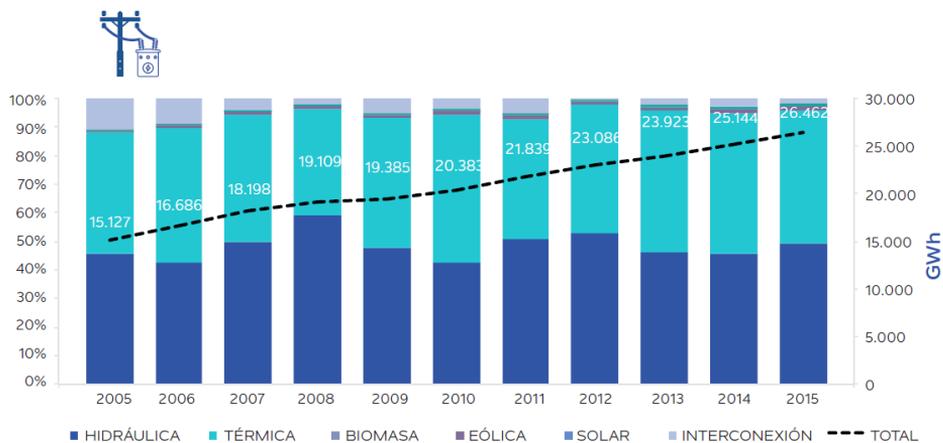


Nota. Adaptado de Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016.

Desde el punto de vista de la generación de energía eléctrica (correspondiente a 16,4 millones de BEP), las fuentes son diversas tomando en cuenta incluso las importaciones provenientes de países vecinos como Colombia y Perú. Al año 2015, el mayor aporte lo hace la fuente hidráulica con casi el 49%, seguido de la térmica que alcanza el 47%. La biomasa en este sector representa el 2% (Figura 7).

Figura 7

Generación eléctrica por fuente, progresión y valores año 2015.



26.462 GWh
16,4 millones BEP

Nota. Adaptado de Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016.

1. 2 Qué es la biomasa, y sus derivados

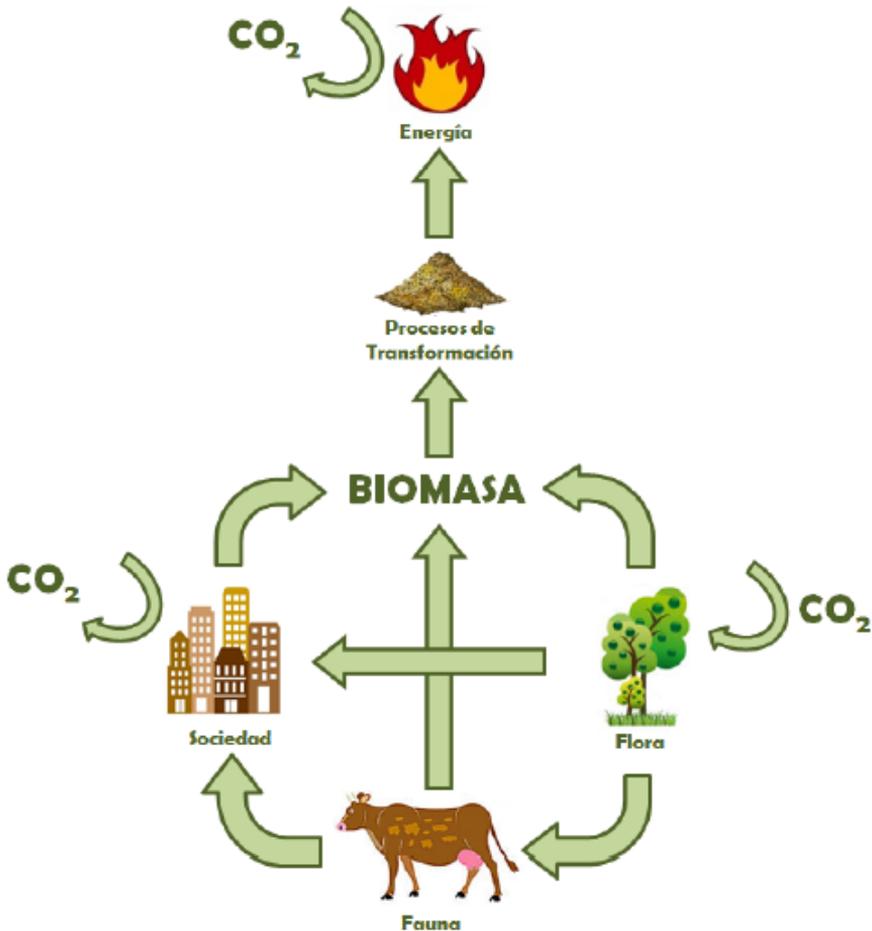
La biomasa o también conocida como bioenergía, se obtiene de la materia orgánica constitutiva de los seres vivos, fundamentalmente de sus desechos, excretos y restos no vivos, en los mismos se consigue una energía acumulada con un bajo contenido de carbón, la presencia en altas cantidades de oxígeno y otros gases volátiles, es una fuente de energía respetuosa del medio ambiente, si generalizamos entonces, la biomasa es todo compuesto orgánico, derivado de una conversión biológica espontánea o inducida y que como consecuencia resulta una fuente energética y además renovable en el tiempo, siendo eso su característica fundamental (Heraz Segura , 2012).

El motor de Carnot estudiado en la termodinámica, se ve representado principalmente en la dinámica de los ecosistemas, siendo la energía solar el motivo fundamental de funcionamiento de dicho motor, es una consecuencia directa de la conservación de la energía, recordemos de los estudios primarios aquella frase que se graba profundamente ***la energía ni se crea ni se destruye solo se transforma***, la cual en el caso de la biomasa se conserva de acuerdo con los postulados de la Primera Ley de la Termodinámica.

Sin embargo, es evidente que no toda la energía solar que llega al planeta se incorpora al ecosistema terrestre, ya que existen muchas otras estructuras a las que llamaremos disipativas, a ello se debe que una porción de la energía proveniente del sol es reflejada en las capas atmosféricas que actúan como espejo entre otras estructuras que pueden disipar buena parte de la radiación solar. La fracción de energía solar que llega a la capa superficial de la tierra es almacenada en el proceso de crecimiento vegetal a través de la fotosíntesis y fluye a lo largo de la cadena trófica, en el transcurso de esa cadena de nutrientes la energía es transportada hasta la biomasa, de ahí que esta sea considerada como fuente renovable de energía (Heraz Segura, 2012). En la Figura 8 se muestra un circuito que explica gráficamente ese ciclo de transformación energética.

Figura 8

Esquema de aprovechamiento de la biomasa.



1.1.1. Clasificación de la biomasa

Desde el punto de vista físico la definición formal de biomasa es equivalente a bioenergía, y se relaciona con la disponibilidad de la misma en relación con sus fuentes originarias, es decir los seres vivos vegetales o animales, sus

excretas o sus restos no vivos, entonces formalmente podemos decir que la biomasa es la unidad de materia orgánica que se puede utilizar como fuente de energía. Según su relación con el ecosistema primario la biomasa la podemos adjetivar como:

Biomasa Natural: es la biomasa que se produce como consecuencia de la degradación espontánea de los restos orgánicos asociados a los ecosistemas no poblados por los **hombres y sus actividades económicas**; hacemos énfasis en que la producción es de forma espontánea, por ejemplo: los bosques.

Biomasa Residual: como su nombre nos lo indica es la biomasa que se obtiene de los residuos dejados por las actividades agrícolas, ganaderas, humanas y forestales, la misma que puede ser clasificada a su vez en seca y húmeda. La biomasa residual seca es por lo común de residuos generados por actividad industria agroalimentaria, forestal y maderera. Y la biomasa residual húmeda la constituyen los vertidos biodegradables, tales como aguas residuales domésticas e industriales incluidos incluso, los residuos agrícolas.

Otro modo ecológico de clasificar la biomasa, es separarla en biomasa primaria y biomasa secundaria. **La Biomasa Primaria:** tiene origen en la fotosíntesis y comprende

toda la biomasa de origen vegetal, y **Biomasa secundaria**: es aquella producida por seres que utilizan para su nutrición la biomasa primaria. Un ejemplo clásico son las deposiciones de animales herbívoros (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014).

Biomasa Forestal, con este nombre se conoce a la industria maderera, la cual genera grandes volúmenes de residuos durante el proceso de explotación y elaboración de sus productos; está considerada aparte de la residual por los volúmenes de desechos que maneja, esta formación de residuos sucede desde antes que la madera sea introducida al proceso productivo hasta la obtención del producto terminado.

El beneficio de los residuos forestales en los procesos industriales, así como residencial, es un requisito social para minimizar el consumo de combustibles fósiles y el impacto ambiental que producen. Son varios los subproductos del aprovechamiento de los residuos forestales como el aserrín, viruta, entre otros; son cadenas industrializada frecuentemente utilizados para la producción de pulpas, papel, tableros, fertilizantes, etc. Sin embargo, los sectores que no cuentan con estas planificaciones o tecnologías su utilización como combustible es lo más corriente.

Un detalle a resaltar sobre la acción forestal en los países en vías de desarrollo, tiene que ver por lo general, con la explotación de bosques naturales y en algunos casos, con plantaciones forestales de crecimiento rápido; es un periodo constituido por tres módulos: el primero es la actividad silvícola, en el segundo módulo tenemos las industrias o talleres de procesamiento primario y en la última parte de estos periodos para cierre de ciclos, los talleres de procesamiento secundario.

Cada uno de estos módulos deja residuos forestales propios de la actividad en cada segmento de producción de la madera y se pueden clasificar en dos subgrupos: el primero de ellos se asocia a la generación o estudio del bosque en las actividades de silvicultura y el segundo de los subgrupos son residuos del procesamiento de la madera; por lo general, estos residuos terminan concentrados en un solo lugar disminuyendo los costos de transporte para su utilización, resultando más factible trabajar con estos residuos.

Del párrafo anterior se desprende la idea que los residuos forestales, del subgrupo de procesamiento industrial representan una sustancial fuente de biomasa. Se tiene evaluado que, por cada árbol utilizado en producción maderera, se aprovecha comercialmente apenas 20%. Un 40% queda en ramas y raíces, y el restante 40% en el proceso de talado y aserrado, por lo general, los sobrantes quedan en forma de

astillas, corteza y aserrín (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014).

En las siguientes Tablas 1 y 2 se identifican los tipos de residuos y las fuentes de dónde se obtienen; es evidente que la madera que usualmente conocemos, utilizada en el área de la construcción o productos terminados son solo un 30% del total del árbol.

Tabla 1

Fuentes de residuos forestales.

Fuente	Tipo de residuo
Operaciones forestales	Ramas, agujas, hojas, tocones, raíces, madera de mala calidad y podrida, recortes y aserrín.
Aserrío	Corteza, aserrín, recortes, madera partida, virutas, lijaduras.

Nota. Adaptado de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación FAO, 1991.

Tabla 2

Distribución de un árbol corriente apeado para madera de aserrío.

Parte o producto del árbol	Porcentaje [%]
Dejado en el Bosque (Operaciones forestales)	
Copa, ramas y follaje	23
Tocón (excluidas las raíces)	10
Aserrín	5
Aserrío	

Parte o producto del árbol	Porcentaje [%]
Virutas, costeros y recortes	17
Aserrín y menudos	7,5
Pérdidas varias	4
Corteza	5,5
Madera aserrada	28
TOTAL	100

Nota. Adaptado de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación FAO, 1991.

Estas Tablas reflejan además, una biomasa disponible entre el 70-80% del total de la madera cosechada; los residuos forestales asociados al talado y aserrado, operaciones forestales, están disponibles energéticamente. En el caso de los desechos de aserrado aportan la ventaja de la facilidad para la recolección y acopio; las grandes industrias de la madera por lo general manejan una línea de procesamiento para residuos y los transforman en otros productos comerciales como aglomerados, entonces la explotación energética no es viable. Por otra parte, la historia cambia en las pequeñas industrias y talleres, porque se convierten en verdaderos usuarios finales de la madera y los residuos generados no se destinan a ninguna línea productiva. Este grupo es un importante agente a tomar en cuenta para el aprovechamiento energético.

Los residuos dejados en el punto de extracción a la hora de la tala tienen dificultades técnicas para su disposición; hablamos de ramas y raíces dejadas en el mismo lugar de

explotación de los árboles, por lo que, se requeriría de maquinaria para su recolección y probablemente en el balance energético, la energía ocupada para disponer de esta materia prima sea superior al valor de la energía producida final, bien sea por combustión o gasificación. Aparte de que los residuos que produce la explotación forestal son una fuente importante de nutrientes para los bosques y reducen el riesgo de erosión del suelo.

1.2. La energía contenida en la biomasa forestal

En toda valoración energética, las primeras tareas para tener en consideración son las características fisicoquímicas del material a usarse para la extracción de energía, con ello se establece el método o tecnología de transformación que se aplicará a dicho elementos o material. Hay otros factores que se vuelven determinantes para la toma de decisión sobre el particular:

1. La facilidad de recolección por la ubicación geográfica.
2. Los costos de acopio.
3. La disponibilidad del material residual.

La Tabla 3 establece las características de la biomasa de origen forestal ajustada a sus niveles de humedad; este indicador de humedad permite calificar al residuo para utilizarse

en procesos de combustión directa o procesos termoquímicos. Podemos diferenciar los procesos de disposición de los residuos en los que pasan por gasificación por su baja humedad y los que pasan por el biodigestor por sus altos contenidos de agua; en la Tabla 4 se indica que, dependiendo la cantidad de humedad contenida en la biomasa, los procesos de transformación de su energía se pueden agrupar en dos categorías.

Tabla 3

Características físicas de la biomasa.

Fuente generadora de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
RESIDUOS FORESTALES	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas.	POLVO SÓLIDO, humedad 30-45%
	Restos de ebanistería: aserrín, astillas, madera trozada.	SÓLIDO DE BAJA HUMEDAD
	Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces.	SÓLIDO, humedad >55%

Nota. Adaptado de Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014.

Tabla 4*Procesos para la transformación de la energía de biomasa.*

A partir de biomasa seca	
Procesos termoquímicos	
COMBUSTIÓN	Calor Electricidad
GASIFICACIÓN	Gas pobre Gas de síntesis Metanol
PIRÓLISIS	Carbón vegetal Aceite de pirolisis Brea vegetal Gases no condensables
A partir de biomasa húmeda o seca	
Procesos químicos y biológicos	
FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	Bioetanol
TRANSESTERIFICACIÓN Y ESTERIFICACIÓN	Metil ester (biodiesel)
DIGESTIÓN ANAEROBIA (FERMENTACIÓN METÁNICA)	Biogás (metano)

Nota. Adaptado de Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014.

1.2.1. Qué es la gasificación y cómo funciona

La gasificación es un proceso que por medio de la aplicación del calor más oxígeno y presión, se logra alcanzar un gas de síntesis, es decir convierte un combustible fósil o no fósil en gases y productos químicos útiles, para lo cual requiere un medio de modo que ocurra esta reacción. Por lo general ese medio puede ser aire, oxígeno, vapor de agua o una mezcla de estos. Este producto es conocido comúnmente como “gas de síntesis” o “syngas”. Las reacciones químicas se forman a una temperatura mucho más alta que una combustión normal entre

500°C y 1300 °C. Los productos de la gasificación por lo general son gases combustibles, entre ellos el monóxido de carbono (CO), el hidrógeno (H₂) el metano (CH₄) entre otros.

Nos podemos preguntar objetivamente por qué es recomendable aplicar la gasificación y las principales situaciones para hacer uso de ella como sustituto de la combustión. Las respuestas son las siguientes:

- Aumentar el valor calorífico del combustible eliminando los componentes no combustibles como el nitrógeno y el agua.
- Eliminar elementos como el azufre y el nitrógeno de modo que el gas resultante se quemara y no los libere a la atmósfera.
- Reducir la relación C/H (carbono-hidrógeno) en la masa del combustible.
- El gas tiene mejores propiedades de combustión respecto al sólido.

Detalles importantes para mantener presente sobre la sustancia gasificante cuando es aire, la reacción da lugar a un gas de bajo poder calorífico llamado “gas pobre”, el poder calorífico es asociado a la calidad del gas, la cantidad de alquitrán y material en suspensión presente en el mismo; el gas pobre es útil para producción energética o calórica en hornos,

motores de combustión interna, micro turbinas a gas, motores Stirling, células combustibles y sistemas híbridos (Basu, 2013).

En las Tablas 5 y 6 se observan datos teóricos del gas pobre producto de la gasificación con distintos agentes gasificantes; el gas de síntesis tiene mejores características que el gas pobre obtenido por el uso del aire, y aunque es más conveniente utilizar este gas en términos energéticos, su producción en términos de costos es restrictiva debido a los costos para obtención de oxígeno o vapor de agua, al final el balance energético global, la cantidad de energía utilizada en la producción del gas de síntesis es mayor a la aprovechable del mismo.

Entonces es preferible producir gas pobre, cuando de aprovechamiento de energía renovable se trata, donde el aire agregado es el 25-30% respecto al necesario estequiométricamente para combustionar totalmente la biomasa; lo importante de allí es que este proceso se diferencia de una combustión simple y pase a ser en resumen una degradación térmica a través de la escasez de oxígeno.

Tabla 5*Poder calorífico inferior de los productos de gasificación.*

Agente Gasificante	Nombre del Producto	Poder calorífico [MJ/m^3]
Aire	Gas pobre	4-7
Vapor de agua	Syngas	10-18
Oxígeno	Syngas	12-28

Nota. Adaptado de Basu, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: practical design and theory, 2013

Tabla 6*Composición de los productos de gasificación.*

Compuesto	Gas pobre [%]	Syngas [%]
Monóxido de carbono CO	11-30	40-50
Dióxido de Carbono CO ₂	6-16	10-20
Hidrógeno H ₂	10-20	25-80
Metano CH ₄	1-3	4-8
Nitrógeno N ₂	50	--

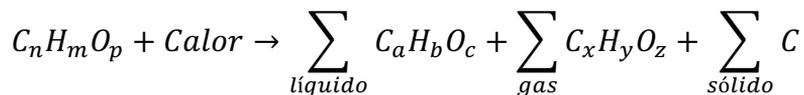
Nota. Adaptado de Basu, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: practical design and theory, 2013

La gasificación de biomasa ha estado siempre asociada a periodos de escasez de petróleo, como en las Guerras Mundiales, aunque terminada la Segunda Guerra Mundial se abandona esta tecnología, y se retoma en la crisis del petróleo del año 1973. Actualmente al vislumbrarse el agotamiento de las reservas energéticas a nivel mundial, en varios países del hemisferio oriental, la gasificación se ha vuelto a utilizar para la generación de energía y para la combustión en algunos procesos industriales (Cabrera et al., 2012).

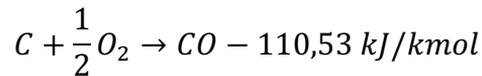
1.2.2. Procedimiento de gasificación y sus teóricos

Como ya indicamos, la gasificación es un proceso termoquímico que transforma los materiales de cadenas carbónicas como la biomasa en combustibles gaseosos útiles. A diferencia de la combustión, también convierte los materiales carbonosos en gases sin poder calorífico, la gasificación deja como producto un gas que tienen poder calorífico de utilidad. En resumen, el proceso de gasificación empaqueta la energía en enlaces químicos, mientras en la combustión se liberan (Basu, 2013).

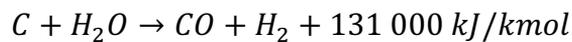
Las fases del proceso de gasificación son las siguientes: se inicia con la fase de secado para extraer la humedad de la biomasa, luego se pasa a la zona de pirólisis donde se produce la primera reacción termoquímica el carbonizado de la biomasa y por último, volátiles que es la fase en donde se produce una descomposición térmica de la biomasa en gas, líquido y sólido (Figura 9). Existe concentración de carbono en los compuestos, pero también está presente y en combinación el hidrógeno y el oxígeno como se aprecia en la siguiente ecuación:



Los productos de la pirólisis y el agua evaporada del secado entran al sector de gasificación donde se encuentra con el agente gasificante (siempre en restricción de oxígeno) y reaccionan en un entorno creado por la temperatura.



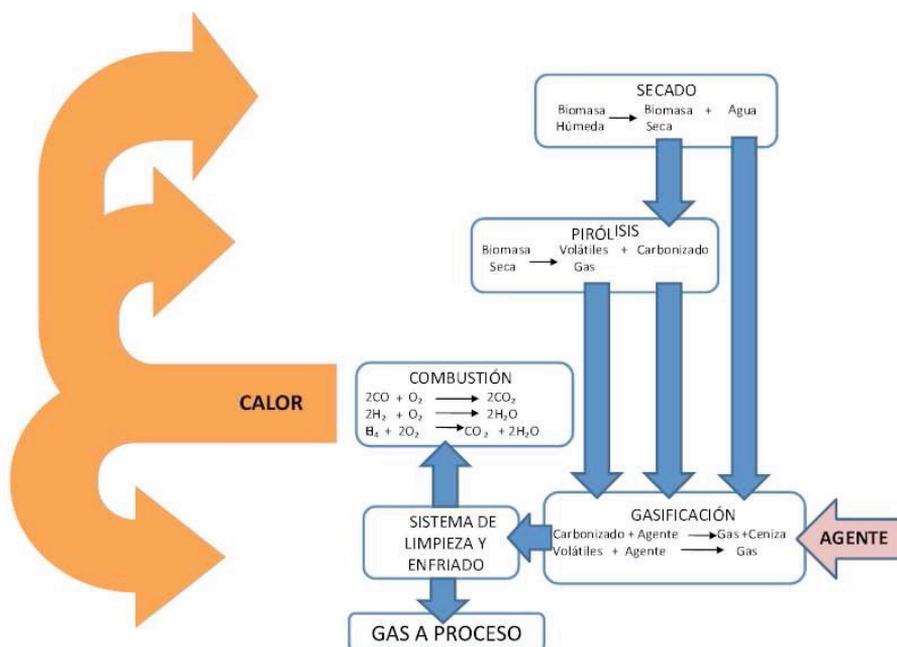
El carbono C y el dióxido de carbono pasan a ser CO (gas combustible). Se reducen los alquitranes. Esta mezcla de gas producto es conocido como gas de síntesis.



La mayor parte de reacciones de la gasificación son endotérmicas, por tal motivo en la fase de combustión parte de los gases combustibles reaccionan con el oxígeno exotérmicamente y liberan energía para que el ciclo complete. Los residuos ya no son sólidos, se degradan térmicamente y se separan en tres partes, una gaseosa, que es el gas pobre, una líquida que es el alquitrán y una sólida residual que son las cenizas.

Figura 9

Esquema del proceso de gasificación.



Nota. Adaptado de García Fernández, 2011.

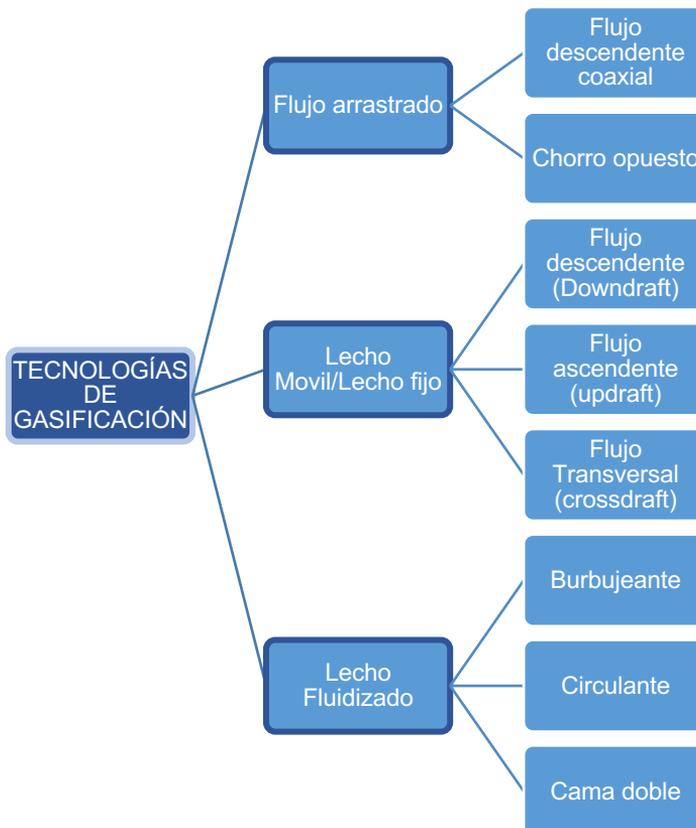
Es importante hacer indicar que el inicio de las operaciones requiere de un suministro de energía, el mismo es de una fuente externa donde se combustiona completamente la biomasa para calentar el equipo, este tiempo es muy importante a pesar de que no se genere gas de síntesis; posteriormente cuando el proceso se estabiliza y comienza la producción de gas, se utiliza una fracción del gas producido para el suministro de energía necesario y así mantener el proceso (Basu, 2013).

1.2.3. Clasificación de los gasificadores

Se clasifican principalmente por el tipo de contacto entre el gas y sólido, es decir entre el medio gasificante y el combustible, que son de tres tipos principales: flujo arrastrado, lecho fijo/lecho móvil y, lecho fluidizado. Cada uno se subdivide en tipos específicos como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Tecnologías de gasificación.

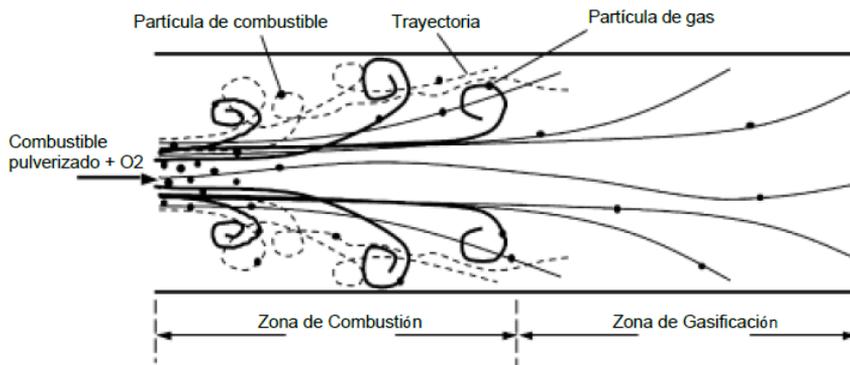


Nota. Adaptado de Basu, Biomass gasification and pyrolysis: Practical Design, 2010.

Gasificador de flujo arrastrado: es un diseño de gasificador muy exitoso, ampliamente utilizado para gasificar a gran escala el carbón, residuos de refinería como el coque de petróleo, no es recomendado para biomasa debido a que el corto tiempo de residencia del combustible en el reactor, esta demanda partículas muy finas y fibrosas. Cuando las cenizas de biomasa se funden estas son altamente agresivas y acortan la vida útil del revestimiento refractario. El modelo más utilizado es el de flujo descendente coaxial donde la temperatura de trabajo sobrepasa los 1000 °C y se obtiene un gas producto casi libre de alquitrán (Figura 11).

Figura 11

Boceto simplificado del flujo de gas-sólido en un gasificador de flujo arrastrado.



Nota. Adaptado de Basu, Biomass gasification and pyrolysis: Practical Design, 2010.

Gasificador de flujo ascendente (Updraft): es un tipo de gasificador antiguo de los existentes, la biomasa de alimentación es ingresada por la parte superior del gasificador, y el agente gasificante es inyectado por la parte inferior. La ventaja más importante es la simplicidad de su diseño, alta proporción de carbón vegetal quemado e intercambio interno de calor que motiva unas bajas temperaturas de salida del gas, la alta eficiencia del equipo y posibilidad de funcionar con muchos tipos de carga como el aserrín, cáscaras de cereales, entre otros. Su mayor desventaja radica en la eliminación de líquidos condensados contentivos de alquitranes. Es adecuado para la cocción donde el gas producido es quemado directamente en un horno o caldera sin limpieza o refrigeración requerida (Figura 12).

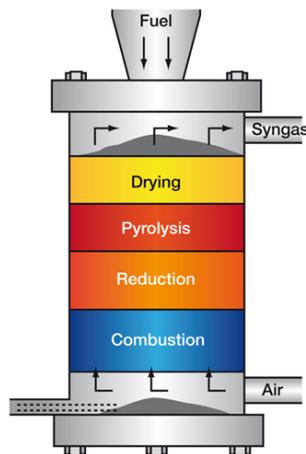
Gasificador de flujo descendente (Downdraft): este diseño soluciona el inconveniente de la cantidad excesiva de alquitrán que presenta el gasificador del flujo ascendente, el gas producido sale por la parte inferior del equipo y tiene una trayectoria paralela a la biomasa de alimentación que ingresa, la misma que debe cumplir ciertas características físicas para no atiborrar su concentración dentro del equipo, por cuanto el aire que debe ingresar no circularía adecuadamente; esto último se consideraría una desventaja y adicionalmente, en comparación con el gasificador Updraft, la eficiencia es un poco menor por la falta de intercambio interno de calor. La ventaja del bajo

contenido de alquitrán, lo hace adecuado para que su gas producto sea utilizado en motores de combustión (Figura 13).

Gasificador de flujo transversal (Crossdraft): Este tipo de gasificador genera altas temperaturas (1500 °C), por lo que el mismo combustible sirve de aislamiento para la instalación. Funcionan muy bien en pequeñas escalas para generadores de hasta 10 kW. Uno de los inconvenientes es la necesidad de utilizar carbón vegetal de óptima calidad de tal manera que no exista gran cantidad de producción de alquitrán. Su tiempo de arranque es corto en comparación con los de flujo ascendente y descendente, siendo beneficioso llamativos cuando la operación tiene cambios de carga; también pueden funcionar en motores con un sistema sencillo de limpieza del gas (Figura 14).

Figura 12

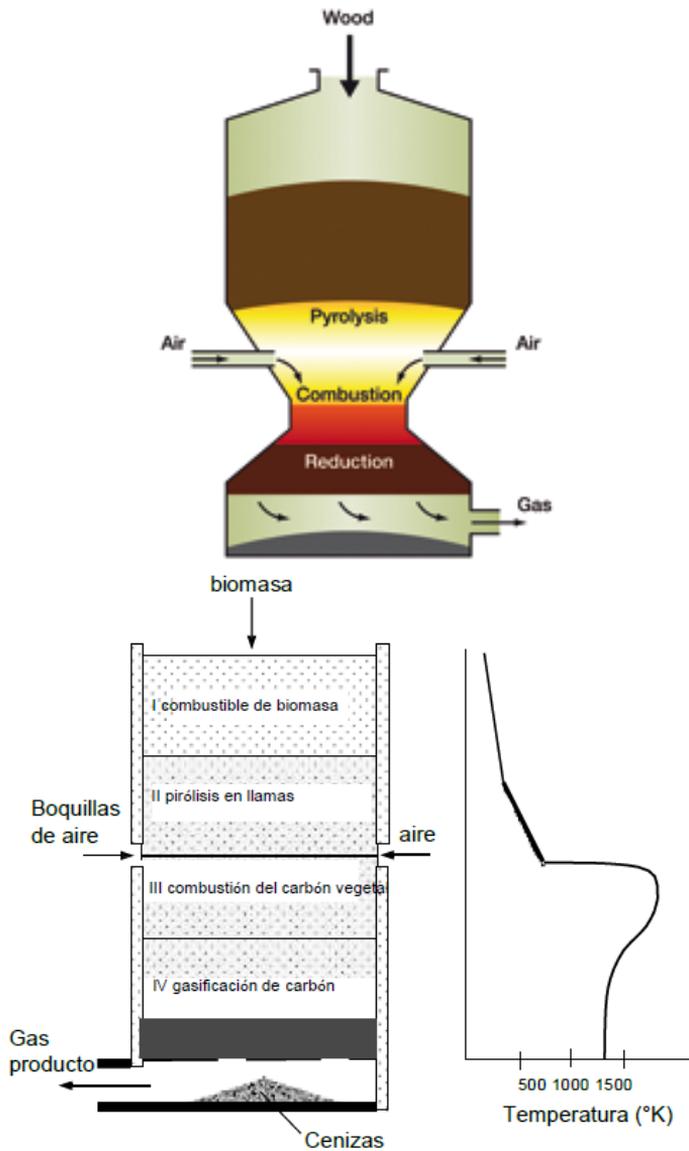
Gasificador de tiro ascendente, Updraft.



Nota. Adaptado de <http://www.gbgasified.com/model.html>

Figura 13

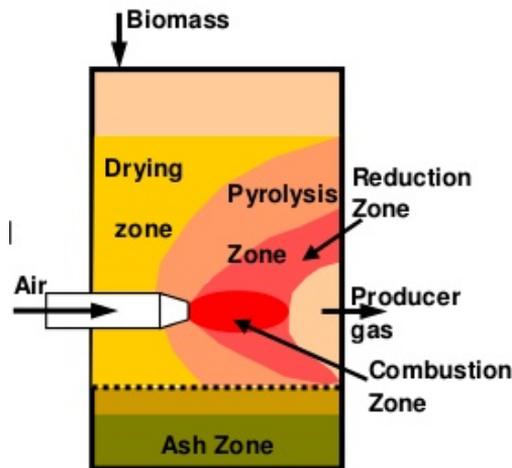
Gasificador de tiro descendente, Downdraft



Nota. Adaptado de <http://www.gbgasified.com/model.html>

Figura 14

Gasificador de tiro transversal, Crossdraft.



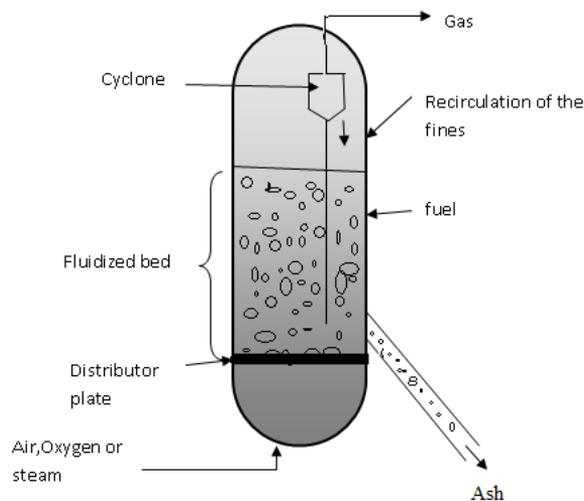
Nota. Adaptado de <http://www.gbgasifired.com/model.html>

Gasificador de lecho fluidizado: los problemas y desventajas presentes en gasificadores anteriormente como lo son la falta de carga en el depósito, la formación de escoria y la caída de presión en el gasificador, asociadas a las propiedades morfológicas, físicas y químicas del combustible. Son corregidas al soplar aire a través de un lecho de partículas sólidas a velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión y otra ventaja es la posibilidad de trabajar con una amplia variedad de biomasa, inclusive una que sea de grano muy fino. Su desventaja es la generación de alto contenido de alquitrán alrededor de unos 10 g/Nm^3 y la poca adaptación a los cambios de carga, lo que imposibilita una planta de pequeña

capacidad no tendría un adecuado funcionamiento, pero para potencias instaladas por encima de 500 kW tienen un óptimo comportamiento (Figura 15).

Figura 15

Gasificador de lecho fluidizado.

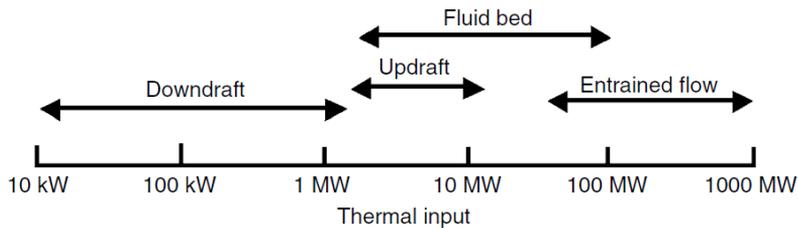


Nota. Adaptado de <https://www.intechopen.com/books/gasification-for-practical-applications/lower-order-modeling-and-control-of-alstom-fluidized-bed-gasifier>.

Podemos tener presente que hay un rango de potencia para el funcionamiento de cada gasificador. Los tipos downdraft y updraft se utilizan para unidades pequeñas (10 kW – 10 MW), los de lecho fluidizado para unidades intermedias (5 MW – 100 MW) y aquellos de flujo arrastrado se utilizan para unidades de gran capacidad (>50 MW), lo podemos ver resumido en la Figura 16.

Figura 16

Rango de aplicabilidad para gasificadores de biomasa.



Nota. Adaptado de Basu, Biomass gasification and pyrolysis: Practical Design, 2010.

En Europa, Estados Unidos y Canadá, los gasificadores de uso común son los downdraft con el 75% de las instalaciones, los gasificadores de lecho fluidizado el 20%, updraft 2,5% y de otros tipos de diseño 2,5% (Basu, 2010). La Tabla 7 muestra una comparativa de las principales características de los gasificadores de lecho móvil/lecho fijo. Es de destacar que cada uno de los gasificadores posee características propias de su funcionamiento y también depende de las propiedades de la biomasa que procesan, estas mismas serán las que determinen su selección para un uso específico.

Tabla 7*Características de los gasificadores lecho fijo.*

COMBUSTIBLE (MADERA)	UPDRAFT	DOWNDRAFT	CROSSDRAFT
Humedad (%)	60 máx.	25 máx.	10 – 20
Cenizas seca (%)	25 máx.	6 máx.	0,5 - 1,0
Temperatura de fusión de ceniza (°C)	>1000	>1250	
Tamaño (mm)	5 – 100	20 - 100	5 – 20
Rango de aplicación (MW)	2 – 30	0,01 - 2	
Temperatura de salida de gas (°C)	200 – 400	700	1250
Alquitrán (g/Nm ³)	30 – 150	0,015 - 3,0	0,01 - 0,1
PCI de gas (MJ/ Nm ³)	5 – 6	4,5 - 5,0	4,0 - 4,5
Eficiencia gas caliente (%)	90 – 95	85 - 90	75 – 90
Relación de rechazo (-)	5 – 10	3 – 4	2 – 3
Carga en el hogar (MW/m ²)	<2,8		

Nota. Adaptado de Basu, Biomass gasification and pyrolysis: Practical Design, 2010.

1.3. Ventajas de la gasificación sobre la combustión

En este punto es posible preguntar: ¿Por qué gasificar la biomasa?, acaso ¿No tiene más sentido quemar directamente el combustible para producir energía térmica?

Para responder los cuestionamientos de inicio de este acápite, compararemos dos plantas de generación de energía eléctricas que compartan un mismo tipo de combustible, como el carbón, la primera planta partirá del Gasificación integrada en ciclo combinado (GICC) y la segunda una Planta de caldera de

carbón pulverizado. Controlaremos el caudal másico de combustible el volumen de gas obtenido en la gasificación es mucho menor comparado con el sistema de combustión directa, con un menor volumen de gas se necesitaría un equipo más pequeño y por tanto costes globales inferiores.

Un combustible que ha sido gasificado incrementa su utilidad en una gama más amplia de aplicaciones, inclusive su distribución para usos industriales o domésticos y su transporte es menos costoso e intensivo. El valor de concentración de CO₂ en el producto de gasificación es más alto que en el de combustión, por lo que sería menos costoso separar y secuestrar el CO₂ de una GICC. Adicionalmente, las emisiones de azufre en una planta por gasificación son más bajas en comparación a una planta de combustión.

El azufre en una planta de gasificación aparece como H₂S y COS, que pueden ser fácilmente convertidos en azufre elemental comercializable. En un sistema de combustión de azufre aparece como SO₂, que requiere un depurador como equipo adicional para producir CaSO₄, que tiene menos potencial de mercado. La gasificación produce menos subproducto de NO_x.

La totalidad de residuos sólidos generados en un proceso de gasificación, es menor que en una instalación de combustión

equivalente. Por último, es importante resaltar desde el punto de vista termodinámico, y en términos de eficiencia sí se necesita trabajo mecánico o eléctrico en un lugar determinado, una solución factible es un gasificador y un motor de combustión interna. Por otro lado, con un sistema de combustión se requiere de una caldera, una máquina de vapor, un condensador que a la final son equipos más voluminosos y en conjunto económicamente más costosos.

La única condición en la que es preferible el uso de un equipo de combustión como las calderas es solo sí el calor es la única forma de energía requerida, la predilección se apunta a la combustión especialmente en plantas de pequeña escala.

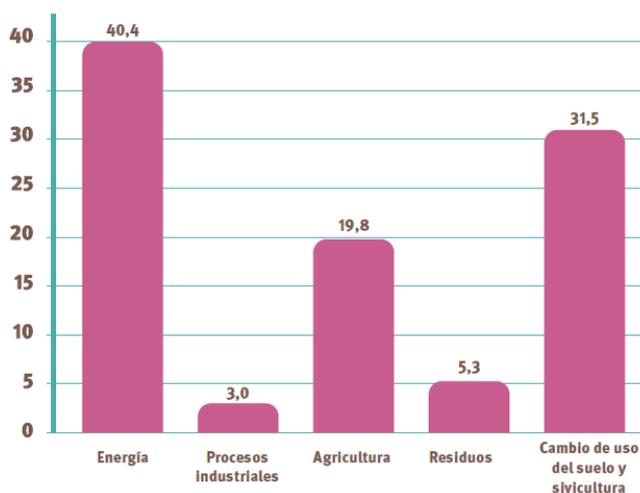
1.4. Biomasa forestal una fuente de energía renovable y amigable con medio ambiente

La producción y el consumo de energía representan 2/3 de las emisiones que causan el efecto invernadero y con ello el cambio climático. El mundo está girando a oportunidades de perseguir un patrón sustentable, aun cuando no han sido tan buenas las opciones emergentes desde el punto de vista energético. Las personas tienen necesidades infinitas de energía, ahora bien, si esta es limpia y confiable disminuye la huella de carbono que ha elevado la temperatura del mundo entero, es por tal motivo que los gobiernos están trabajando

para conseguir economías con bajo impacto ambiental. Desde el punto de vista alternativo, las energías renovables como la hidroeléctrica, la solar y eólica son cada vez más competitivas. Ya hemos indicado que América Latina representa cerca del 5% de las emisiones mundiales provenientes de la energía. Las emisiones provenientes de energía representan el 40% de las emisiones totales de la región, el 20% corresponden a la agricultura, 32% son del cambio de uso de suelo y silvicultura, 5% a residuos y 3% a los procesos industriales (López & Moscoso, 2016) como se aprecia en la Figura 17.

Figura 17

América Latina y el Caribe: porcentaje de participación en la emisión de gases efecto invernadero.

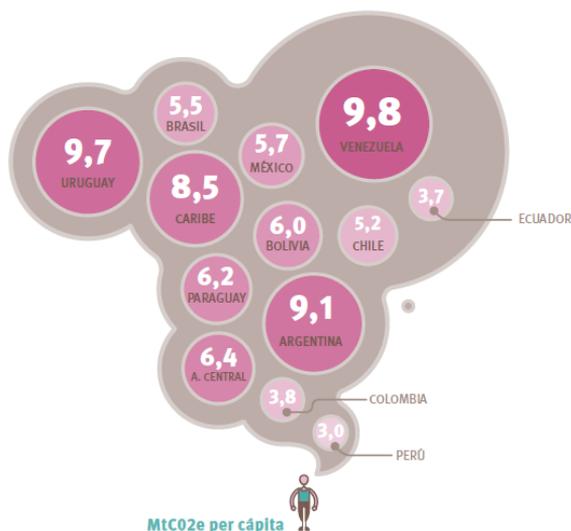


Nota. Adaptado de López & Moscoso, 2016.

La generación de gases de efecto invernadero mundial está alrededor de 11,6 toneladas métricas de CO₂ anuales per cápita. En Latinoamérica varios países se están alrededor de 10 toneladas y otros se mantienen por debajo de este valor, lo podemos observar en la Figura 18. Es un requerimiento para la región orientar esfuerzos para reducir las emisiones anuales per cápita. La mayoría de los estudios apuntan a una reducción de 7.6 toneladas de CO₂ a 2 toneladas para el año 2050 y menos de 1 tonelada para finales del siglo 21 (López & Moscoso, 2016).

Figura 18

Gases de efecto invernadero per cápita en ALC, tCO₂.



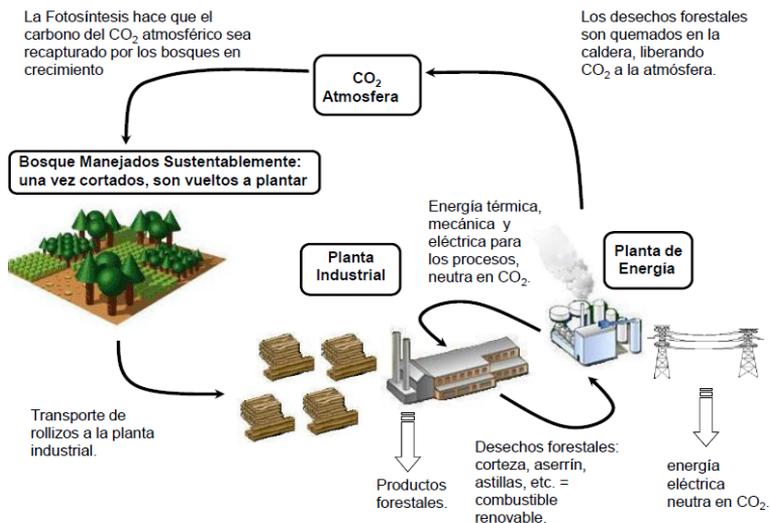
Nota. Adaptado de López & Moscoso, 2016.

El Ecuador representa el 0,2% de generación de CO₂ a nivel mundial, las acciones implementadas para la reducción de los mismos, si bien no representan un impacto fuerte a escala global, representarán una actitud ética, coordinada y eficiente acorde con la visión de un futuro sostenible, y la garantía de asegurar el bienestar de los habitantes de la nación por las mejores condiciones de la calidad del medio ambiente de dicha nación.

Es importante en este punto entender el ciclo que se presenta en la Figura 19, con ello se puede percibir que la bioenergía forestal solo se considera renovable si el crecimiento de la biomasa rebasa la cosecha forestal, y el dióxido de carbono emitido durante la producción, transporte y elaboración no supera al que ha sido capturado por la biomasa cosechada para obtener energía (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación [FAO],2008).

Figura 19

Esquema de ciclo de CO₂ en la utilización de la Dendroenergía.



Nota. Adaptado de <http://www.bioeconomia.mincyt.gov.ar/wp-content/uploads/2014/12/7>.

Desde un punto de vista medioambiental, la eficiencia en la disposición del carbono de los sistemas de cogeneración basados en la madera es generalmente alta respecto a las fuentes de energía no renovables como los combustibles fósiles, incluso sobre la mayoría de otros biocombustibles, una planta eléctrica basada en la gasificación de ciclo combinado alimentada con astillas de madera libera sólo 60 g de CO₂ por kilovatio de energía producida. Una instalación similar, alimentada con gas natural, deja una huella de carbón de alrededor de 427 g de CO₂ (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación [FAO], 2008).

Conclusiones del capítulo

Este capítulo discurre por el espacio conceptual y operativo de la biomasa como fuente alternativa de energía, se estableció la relación entre la bioenergía acumulada a través de la captación solar por las células vegetales; en la explotación forestal, se mostró con la cantidad de sobrantes, son en sí mismos, un potencial energético importante para su aprovechamiento; que los residuos pueden ser a la larga un problema por ocupación de espacios y por la posibilidad de generar incendios, que es un pasivo ambiental más que un activo energético.

Los residuos madereros sobrantes que quedan en los aserraderos, comúnmente no son utilizados, y son fuentes probables de problemas ambientales perjudiciales. Ahora el proceso de aprovechamiento de estos desechos conocidos como biomasa puede producir energía, y resolver a la vez los problemas energéticos y la eliminación de residuos. Se tienen dos modelos de generación de energía uno a través de las reacciones de combustión y el otro por las reacciones de gasificación, en ambas el combustible proviene de los residuos que poseen una bioenergía acumulada por la acción solar y la

fotosíntesis vegetal. En uno de los modelos de producción por combustión, se emplean máquinas de vapor sencillas que producen electricidad. Varias calderas de generación de vapor son alimentadas con residuos forestales como corteza y madera trozada, estas mismas se pueden integrar en los aserraderos como una alternativa para la utilización de los residuos. Las calderas de recuperación tienen una función similar en las fábricas de papel. Para aprovechar mejor aún la energía en estos procesos es conveniente analizar el diseño de estos ciclos de vapor con cogeneración.

Es importante tener presente el asunto de la eficiencia de un ciclo de generación de vapor convencional es por lo general del 40%, mientras que las plantas reales de cogeneración tienen factores de utilización tan altos como el 80%. (Yunus & Michael, 2011). Si el objetivo es la generación eléctrica, la gasificación desde el punto de vista de la eficiencia puede alcanzar rendimientos eléctricos entre 30-32% con el uso de moto-generadores accionados por GAS de síntesis, mientras que con un ciclo Rankine convencional simple las cifras son del 22% de rendimiento eléctrico. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía [IDEA], 2007) por ello las plantas de gasificación son la mejor alternativa cuando la escala de suministro de energía es pequeña.

Lo cierto hasta este punto es que la generación eléctrica con la gasificación de la biomasa forestal es más bajo que con generadores de diésel, el problema fundamental de este modelo alternativo energético es que a nivel mundial la aplicación de masificadores presenta el inconveniente que es la disponibilidad de la materia prima y los costos de sus insumos asociados a la instalación y operación de los mismos.

Capítulo 2

Modelo para el levantamiento del potencial
de biomasa, caso de estudio Riobamba



Modelo para el levantamiento del potencial de biomasa, caso de estudio Riobamba

En este capítulo se presenta información asociada a la cantidad de biomasa residual forestal que se genera en la región de Riobamba, como consecuencia de la industria maderera, involucrando las zonas rurales y urbanas, registrando y cuantificando las especies que generan esta biomasa, así como también el tipo de residuo; aserrín, viruta, madera trozada y corteza.

El estudio realizado en el cantón Riobamba se detectaron varios lugares con residuos forestales que aparecían debido a la actividad económica lo que generaba un costo para su desalojo a áreas fueran de la conurbación, donde se acumulaba en forma de basura a la cual se le sumaban otros tipos de desechos para posteriormente quemarlos, generando contaminación ambiental propia de no disponer como tratar esta biomasa. Vamos a recordar que la cantidad de energía aprovechable de esta biomasa bajo la utilización de un

gasificador de tipo downdraft, el mismo que cuenta con un sistema básico de acondicionamiento del syngas producido, que es económicamente viable como una fuente de energía alternativa en la localidad estudiada.

Los datos de disponibilidad de biomasa forestal se obtuvieron a partir de un censo realizado por grupos de investigación de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH en el cantón Riobamba a todos los establecimientos que trabajen con madera, luego se caracteriza el gas producido para estimar el potencial energético aprovechable y las alternativas de aprovechamiento socioeconómico local.

Por otra parte, la caracterización del gas producido a partir de la biomasa forestal endémica de la zona en estudio al ser colocada en el gasificador downdraft, a través del uso de la cromatografía de gases se determinó la composición del gas obtenido y su poder calorífico, por eso se realizaron varias pruebas de gasificación y seguir un protocolo diseñado de muestreo. Adicionalmente se realiza un análisis financiero así como la viabilidad de una planta piloto de generación de gas pobre, se realiza una vez cuantificada la cantidad de biomasa residual disponible, ubicación de la biomasa residual disponible, calculada la eficiencia en frío del gasificador downdraft y el poder calorífico del gas producido para poder determinar escenarios como: viabilidad económica de generación a partir

de biomasa residual maderera donada y energéticos frente a los cuales puede ser una alternativa útil sector urbano y rural.

2. Levantamiento de la información

La actividad de caracterización de los potenciales de la región, a través de la toma de datos, permitió configurar áreas de trabajo en el cantón Riobamba que cuenta con una extensión de 980 km². Segmentada en 05 parroquias urbanas denominadas Lizarzaburu, Maldonado, Velasco, Veloz y Yaruquíes que ocupan apenas el 59 km² y 11 parroquias rurales, conocidas como: Cacha, Calpi, Cubijíes, Flores, Licán, Licto, Pungalá, Punín, Químiag, San Juan y San Luis, esta información es provista por GAD provincial de Chimborazo, 2015.

Se realizó un barrido de la superficie ubicando los lugares donde trabajan con madera y sus derivados en los distintos aserraderos, talleres y puntos de venta; el área urbana se dividió en 24 sectores con un total de 100 bloques y cada parroquia rural conforma un sector, es decir resultaron 35 sectores en estudio. A cada sector fue abordado por 3 estudiantes encuestadores voluntarios de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), los cuales recibieron una capacitación en cuanto a la información requerida,

unidades de medida y valoración, relación interpersonal con los encuestados y ubicaciones de los diferentes sectores.

Se trabajó con una mirada centrada en la cuantificación, por eso el modelo de investigación está centrado en una mirada objetiva para la recolección de datos y su tratamiento estadístico, los descriptivos con los datos tabulados a través de las encuestas. Asimismo se trabajó en un diseño no experimental debido a que no se manipularon las variables, sino que se tomaron de la fuente directa. Transversal ya que se han recopilado los datos de interés en un momento determinado y coordinado con los estudiantes participantes. Descriptivo ya que se indagan la incidencia de los residuos forestales como fuente energética. La muestra tratada es no probabilística dado que el objetivo es identificar la totalidad de establecimientos que trabajan con madera y la recolección de datos se los ha realizado a través de encuestas con un tipo de preguntas cerradas (Hernández Sampieri et al., 2010).

2.1. Parámetros del potencial energético de biomasa residual de industria maderera del Riobamba

Los parámetros requeridos y esenciales para determinar el potencial de la región escogida, fueron la ubicación de los establecimientos que trabajen con madera, cantidad y en esta pesquisa privaron datos como tipo de materia prima que se

utiliza en la industria maderera, cuantificar la cantidad y tipo de residuos forestales que se genera, cuál es y si la tiene, su utilización final o destino, impacto económico debido a la generación de los residuos desde el punto de vista de los costos o beneficios y una pregunta por demás interesante, si los residuos están disponibles para fines energéticos.

La densidad poblacional de la conurbación es de 2654 habitantes/km², se dividió el espacio geográfico en 24 sectores, con 111 habitantes/km² por unidad territorial censada. En el plano base de Riobamba se muestra la distribución territorial proporcionada por el municipio de la ciudad que data de 2015. El mapa correspondiente a la delimitación de sectores área urbana se encuentra en el Anexo 1. Para el área rural, las 11 parroquias que la conforman pasan a ser un sector propiamente dicho, el promedio de densidad poblacional en el sector rural es de 147 habitantes/km², de la misma manera con un mapa actualizado se detalla la localización y límites de estas, ver Anexo 2. Con este material se tiene definido las extensiones de los 35 sectores y los encuestadores marcaron la localización exacta de la cada uno de los establecimientos.

En la Tabla 8 se presentan los valores de densidad poblacional tanto para el sector urbano como para el sector rural del cantón Riobamba.

Tabla 8

Densidad poblacional a nivel parroquial en el cantón Riobamba.

Código	Nombre de parroquia	Población [hab]	Superficie de la parroquia [km ²]	Densidad Poblacional [hab/km ²]
060150	RIOBAMBA	156.723	59,05	2.654,07
060151	CACHA	3.160	26,29	120,20
060152	CALPI	6.469	53,53	120,85
060153	CUBIJÍES	2.514	12,54	200,48
060154	FLORES	4.546	37,39	121,58
060155	LICÁN	7.963	26,94	295,58
060156	LICTO	7.807	58,42	133,64
060157	PUNGALÁ	5.954	281,33	21,16
060158	PUNÍN	5.976	47,89	124,79
060159	QUIMIAG	5.257	139,51	37,68
060160	SAN JUAN	7.370	210,53	35,01
060161	SAN LUIS	12.002	29,27	410,04

Nota. Adaptado de Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC, 2016.

El diseño de la encuesta, véase el Anexo 3, se conforma básicamente por dos partes, la primera una información del propietario y establecimiento, y la segunda que es la parte técnica se indaga:

- ¿Qué tipo de materia prima dispone para su proceso productivo y en qué cantidad?
- ¿Qué clase de desperdicios de industria maderera genera su proceso productivo?

- ¿Qué cantidad de desperdicios de industria maderera genera su proceso productivo?
- ¿Qué destino le da al desperdicio de industria maderera?
- ¿Le implica algún redito y/o gasto económico deshacerse del desperdicio de industria maderera?
- ¿Estaría dispuesto a donar su desperdicios de industria maderera a la ESPOCH con fines investigativos?

En cada pregunta estableció la cantidad volumétrica de la materia prima y de la biomasa residual que se esté tratando en base a los datos proporcionados por los encuestados. Las dimensiones de las unidades volumétricas de uso común se encuentran a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9

Dimensiones de la materia prima.

PRESENTACIÓN MATERIA PRIMA	Longitud L [m]	Ancho a [m]	Espesor e [m]	Volumen V [m³]
Tablón	2,44	0,203	0,025	0,0252
Tabla	2,44	0,203	0,051	0,0126
Plancha de MDF	2,44	2,135	0,018	0,094
Plancha de laminado	2,44	2,135	0,018	0,094
Plancha de MDP	2,44	2,135	0,018	0,094
Plancha de Aglomerado	2,44	2,135	0,018	0,094
Plancha de Melamínico	2,44	2,135	0,018	0,094
Plancha de Triplex	2,44	1,22	0,015	0,045

Nota. Adaptado de
http://www.cotopaxi.com.ec/sites/default/files/ficha_duraplac_crudo.pdf.

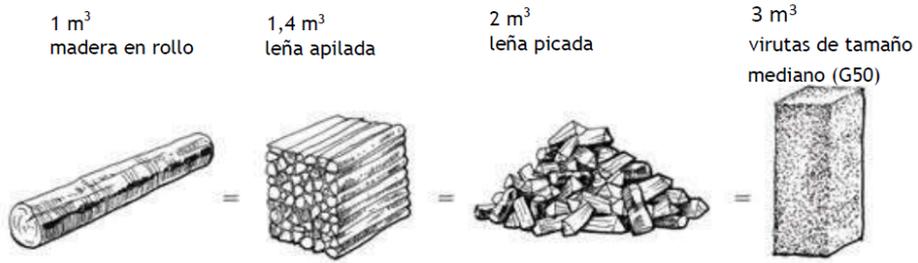
En un sondeo inicial se conoce que pocos establecimientos contabilizan la cantidad de residuos de industria maderera en metros cúbicos, que sería lo adecuado, especialmente aquellos que trabajan de manera artesanal y son de escalas pequeñas; estos utilizan la estimación a través de sacos. Un saco comercial tiene como dimensiones 0,77x0,49x0,17 m³ (0,064 m³).

Escasos locales comerciales manejan un inventario donde cuentan directamente con la masa de material procesado eso incluye la materia prima y los residuos. Para ello es necesario una estandarización de la unidad de medida. En cada clase de residuo, la forma geométrica de la pieza de material determinará espacios de aire internos y por tanto una cantidad mayor de espacio ocupado por el material con referencia a la madera solida o comúnmente llamada en rollo (Figuras 20 y 21).

Además de la forma geométrica de cada pieza de material, la aparición de espacios de aire a los que se hace mención, aumentan o disminuyen según el ordenamiento del material, apilado (stock) o suelto al granel (bulk, loos). Los factores para la conversión del volumen se hallan en las Tablas 10 y 11.

Figura 20

Factores básicos de conversión.



Nota. Adaptado de Krajnc, 2015.

Figura 21

Clases de residuos forestales.



Recordemos que por nociones elementales existe una relación entre la masa de un material y el volumen que este ocupa, dicha relación se conoce como densidad, por el efecto en el volumen antes citado se debe hacer mención a dos definiciones de densidad para los residuos forestales:

Densidad aparente: es la masa de una parte de un combustible sólido dividido por el volumen del recipiente que se llena bajo condiciones específicas. Se utiliza para pilas de combustible de madera y los residuos de madera como virutas, aserrín, astillas también leña. En la Tabla 12 se enlistan los valores de densidad aparente correspondientes a combustibles de madera.

Densidad básica: es la relación de la masa sobre una base seca y el volumen sólido sobre una base verde (Krajnc, 2015).

Tabla 10*Factores de conversión para diferentes combustibles de madera.*

CLASIFICACIÓN	MADERA EN ROLLO	MADERA DE 1m DE LARGO	LEÑO (25-30cm)		CHIPS DE MADERA	
	m ³ sólido	m ³ apilado	APILADA m ³ apilado	SUELTA m ³ suelto	FINA m ³ suelto	MEDIA m ³ suelto
1m ³ de madera en rollo	1	1,4	1,2	2	2,5	3
1m ³ de madera de 1m de largo	0,7	1	0,85	1,4	1,8	2,15
1m ³ de leños apilados (25-30cm)	0,85	1,2	1	1,67	2	2,5
1m ³ de leños sueltos (25-30cm)	0,5	0,7	0,6	1	1,25	1,5
1m ³ de chips de madera tamaño fino	0,4	0,55	0,5	0,8	1	1,2
1m ³ de chips de madera tamaño medio	0,33	0,47	0,4	0,67	0,85	1

Nota. Adaptado de Krajnc, 2015.

Tabla 11*Factores de conversión de residuos de madera seleccionados.*

COMBUSTIBLES DE MADERA	EQUIVALENCIA
1m ³ de leña apilada o en bloques	0,65m ³ de madera sólida o en rollo
1m ³ de chips de madera sueltos	0,33m ³ de madera sólida o en rollo
1m ³ de aserrín suelto	0,33m ³ de madera sólida o en rollo
1m ³ de viruta suelta	0,20m ³ de madera sólida o en rollo
1m ³ de corteza suelta	0,30m ³ de madera sólida a o en rollo

Nota. Adaptado de Krajnc, 2015.

Tabla 12*Valores típicos de densidad aparente para los combustibles de madera seleccionados.*

COMBUSTIBLE DE MADERA		DENSIDAD APARENTE [kg/m³]
Leña surtida	Haya	460
Leña surtida	Abeto de Noruega	310
Astillas de madera	Conífero	195
Astillas de madera	Hojas anchas	260
Corteza	Conífero	205
Corteza	Hojas anchas	320
Polvo		170
Viruta		90
Pellets		600

Nota. Adaptado de Krajnc, 2015.

La estandarización y ajuste de las unidades de medida permitió obtener a través de la encuesta, los datos de volúmenes de la biomasa y contar con su correspondiente densidad teórica en los distintos tipos de biomasa, se calcula la masa disponible, que es el dato a través del cual se identifica la cantidad de energía de la que se puede disponer.

Un dato para tener presente es que los combustibles a base de madera son de diversos tipos, y su origen se asocia al proceso que se someten, dicho proceso incide directamente en la humedad¹ presente en la madera combustible, además del proceso de secado de la materia prima de la cual proceden. Otros factores a tener en cuenta son el tipo de almacenamiento y transporte. Se han identificado los valores de humedad de residuos madereros corrientes para diversas especies, y se presentan en la Tabla 13. Para un aprovechamiento efectivo de la energía disponible de los combustibles de origen orgánico se debe tomar en cuenta el contenido de agua y el tipo de material.

¹ La humedad de la madera, es un término empleado usualmente en la industria maderera, puede describirse como la relación entre el agua y la materia seca. Sin embargo, para el aprovechamiento energético de la madera los cálculos se hacen utilizando el contenido de agua. El contenido de agua puede describirse como la relación entre el agua y la materia total (masa fresca o verde). El contenido de agua es la variable más importante para definir la calidad de las astillas de madera (Krajnc, 2015).

Tabla 13

Humedad y cenizas de residuos madereros corrientes.

RESIDUOS	TAMAÑO [mm]	HUMEDAD [%]	CENIZAS [%]
Lijaduras	<1	2-10	0,1-0,5
Virutas	1-12	10-20	0,1-1,0
Aserrin	1-10	25-40	0,5-2,0
Corteza Desmenuzada	1-100	25-75	1,0-2,0
Leña*	250-300	20	-

Nota. Adaptado de (Serret Guasch, Giralt Ortega, & Quintero Ríos, 2016), (Krajnc, 2015)*

Cuando se reconoce el tipo de material aparece una propiedad llamada poder calorífico, que se define como la cantidad de energía por unidad de masa o volumen liberado en la combustión completa. La humedad de la madera cambia el valor del poder calorífico, mediante la reducción de la humedad presente en la madera, debido a que la energía liberada en la combustión de la madera se consume en la evaporación y secado de la agua contenida en la madera. La evaporación del agua implica el consumo de 2,44 MJ por kg de agua.

Es posible distinguir entre dos denominaciones, poder calorífico superior y poder calorífico inferior (Krajnc, 2015); el poder calorífico inferior de la madera seca de diferentes especies varía dentro de un muy estrecho intervalo, desde 18,5 a 19 MJ/kg. Pero como se indicó anteriormente, el contenido de agua es determinante en el valor del poder calorífico; existen

tablas elaboradas en donde se presenta los valores del poder calorífico en función de la cantidad de humedad para ciertas especies de madera. Durante el secado, el 10% de disminución en la humedad implica un aproximado de 2,16 MJ/kg (0,6 kWh/kg) de incremento en el contenido de energía (Krajnc, 2015). En el Anexo 4 se presentan los valores del poder calorífico de la madera en función de la cantidad de humedad.

En este punto es importante hacer varias salvedades de modo académico y como un acto pedagógico para ilustrar lo complejo del asunto que tratamos en este apartado, tenemos dos variables que modifican la cantidad de energía que se puede extraer de la biomasa forestal, la primera es la humedad y la segunda el tipo de madera de la cual procede el residuo, no tenemos garantías de que todos los residuos de madera procedan de un mismo tipo y que la humedad sea uniforme, esto podría representar una preocupación adicional, aun cuando teóricamente la diferencia y rango de variación del poder calorífico entre la madera según su tipo son intervalos de variación muy estrechos, lo realmente complicado, es que en el proceso de gasificación la presencia de humedad en la biomasa consume energía para su evaporación y esta agua evaporada al condensarse en las paredes del equipo resulta en alquitranes, mismos que no son deseables por los efectos contaminantes asociados a su presencia.

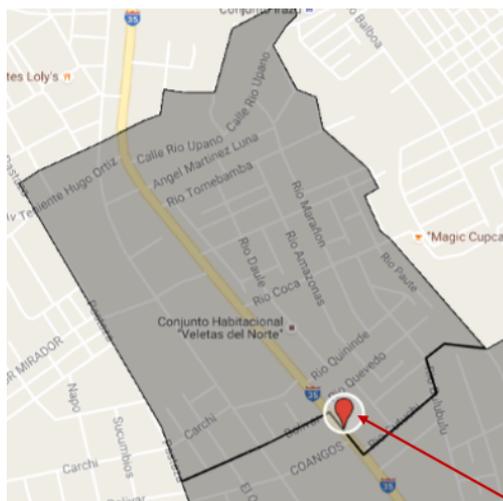
2.2. Acerca del proceso de encuesta

El proceso de encuestado se llevó a cabo bajo la supervisión de docentes de la ESPOCH. Los estudiantes encuestadores identificaron todos los establecimientos que laboran con madera en el sector que se les asignó, contactaron con el personal a cargo, dieron a conocer el objetivo de su visita, a parte del correcto llenado de las encuestas observaron el material de materia prima como de residuos y ubicaron en un mapa del sector censado. Todas las actividades se documentaron fotográficamente. Tal como se aprecia en la Figura 22.

Figura 22

Proceso de encuestado parroquias urbanas y rurales.





1.a

Los datos obtenidos de las encuestas aplicadas se digitalizan, compilan y tabulan en conjuntos por sectores para valorar los totales teniendo en cuenta el sector urbano y el sector rural, los mismos que se presentan de manera detallada más adelante.

2.3. Equipo de gasificación utilizado

El gasificador utilizado para la prueba piloto, y que se dispone como colaboración para los fines académico investigativos, forma parte del laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, sus datos técnicos se muestran a continuación:

Tabla 14

Características técnicas del gasificador Downdraft ESPOCH.

Características	Descripcion
Tipo de gasificador	Lecho fijo, downdraft
Combustible	Biomasa con humedades no mayores al 25%
Capacidad de procesamiento	40kg/h
Dimensiones de biomasa	Elementos de hasta 10cm por lado, no recomendado para trabajar con aserrín o viruta directamente por la compactación que se produciría del material en el hogar
Agente gasificante:	Aire
Sistema de tratamiento de gas producido	Ciclón, enfriador y filtro de gas

Podemos visualizar que las Figuras 22 y 23 el ingreso de la biomasa es desde la parte superior y el aire, agente gasificante, se inyecta desde una tubería que recorre axialmente el eje del cuerpo central, la impulsión de aire se la realiza por medio de un ventilador centrífugo y es este mismo elemento el encargado de dotar la energía necesaria para que la corriente de gas pobre llegue hasta la salida.

Figura 23

Diagrama de bloques del gasificador downdraft ESPOCH.

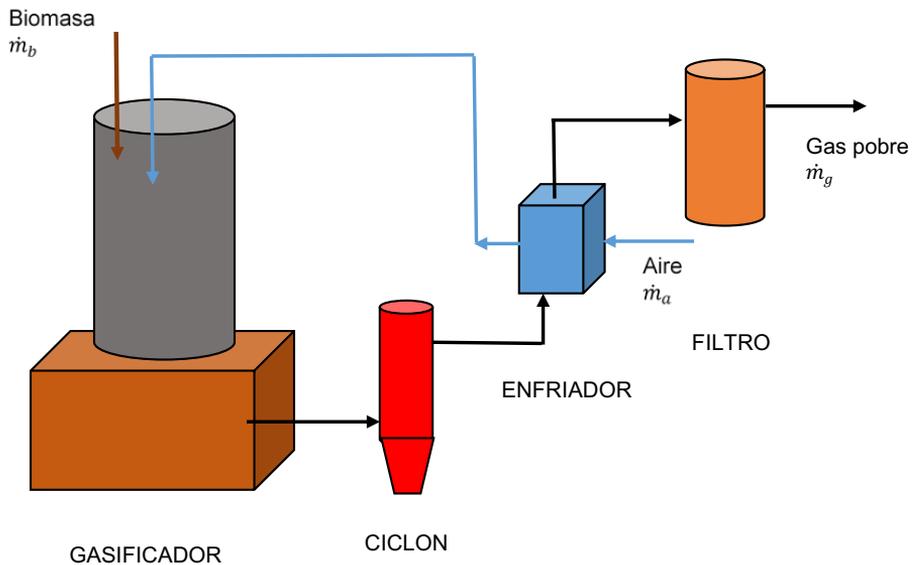
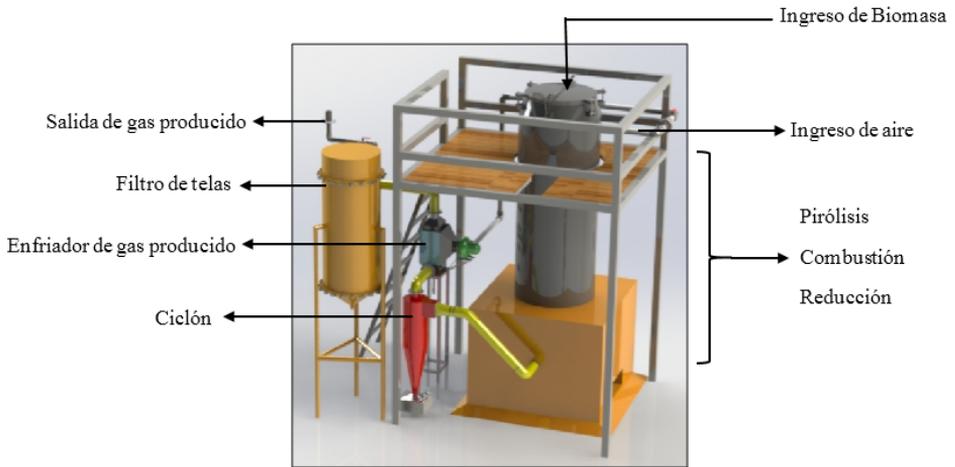


Figura 24

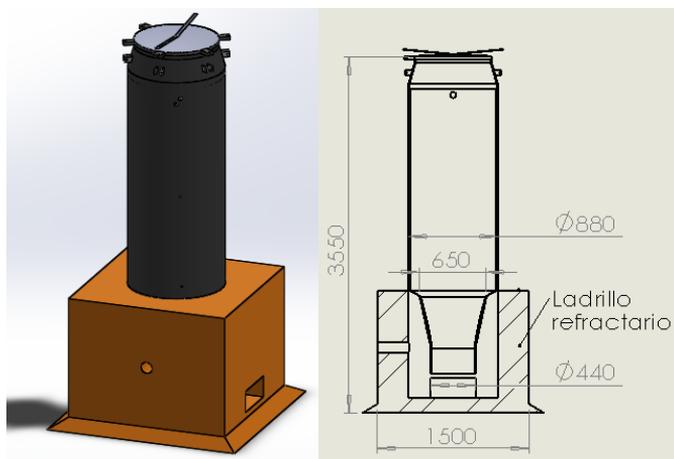
Representación gráfica de gasificador Downdraft ESPOCH.



Cuerpo principal: es el lugar donde se producen las reacciones termoquímicas al encontrarse la biomasa con el agente gasificante aire, las principales dimensiones se encuentran a continuación (Figura 25).

Figura 25

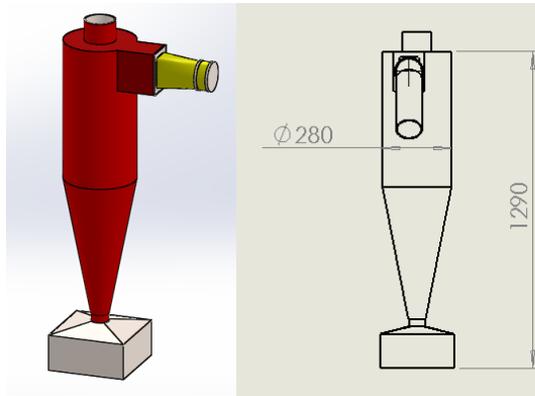
Esquema cuerpo principal del gasificador.



Ciclón: es el primer elemento de acondicionamiento del gas pues retiene el material particulado de mayor tamaño. Al usar biomasa residual de la industria maderera, las partículas de combustible pequeñas generalmente provocan mayores concentraciones de polvo en el gas que al utilizar tacos de madera. Para gasificadores normales tipo downdraft, se produce polvo en cantidades que varían entre 0,5 y 5 g/m³ a este parámetro se lo conoce como concentración de partículas en la corriente gaseosa C_{par} . De esta cantidad de polvo generada en el ciclón se separa del 60 al 65% (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO, 1993), (Figura 26).

Figura 26

Esquema ciclón.



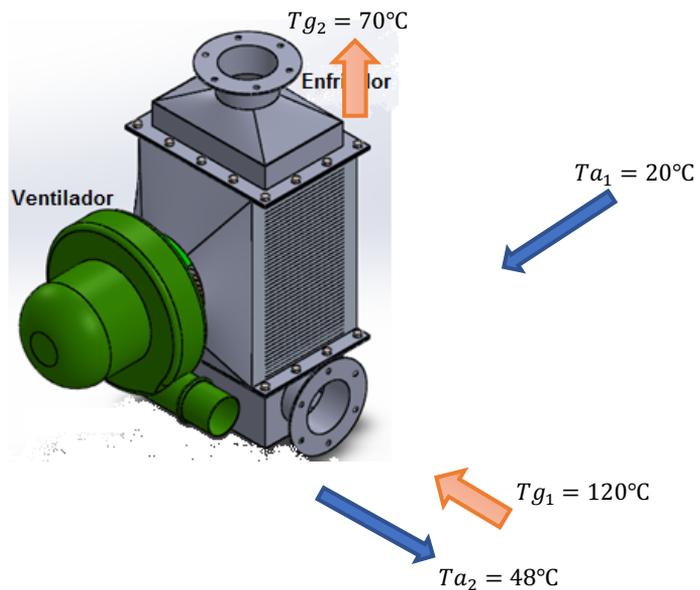
Enfriador: la necesidad de enfriamiento del gas producto depende del uso que se le otorgue. Cuando se destina a la generación de energía térmica como la quema directa en calderas, no es un condicional la disminución de la temperatura del gas producto y se le puede usar directamente. En cambio cuando se pretenda destinarlo a la generación de energía eléctrica o motriz como en el caso de un motor de combustión interna, es necesario enfriar el gas pobre producido con la finalidad de aumentar el valor de la densidad con la que estaría ingresando a la cámara de combustión y además de evitar condensaciones al contacto con el aire (Basu, 2010).

El gas pobre producido que ha pasado por el ciclón, se encuentra a una temperatura aproximada de 115-120 °C, se le pretende enfriar a una temperatura de 70 °C. El calor desprendido por el enfriamiento puede ser aprovechado para

calentar el aire que ingresa al gasificador con lo cual se vería mejorado el ciclo completo de gasificación al ahorrar la disipación de energía al medio ambiente. El aire a temperatura ambiente se encuentra a 20 °C y después del intercambio de calor tiene un valor cercano a los 48 °. El enfriador es un intercambiador de flujo cruzado el mismo que se representa gráficamente en la Figura 27.

Figura 27

Temperaturas de fluidos en el conjunto enfriador de gas y ventilador de aire.

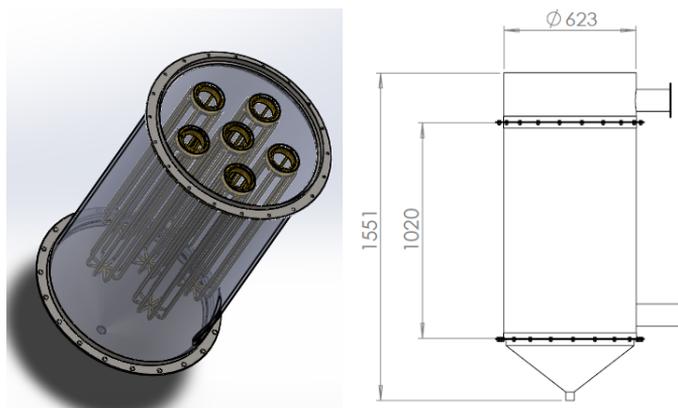


Filtro: el sistema de filtrado es por tela de lana de vidrio debido a que puede trabajar a temperaturas cercanas a 260 °C, y la configuración geométrica es en mangas circulares.

Funciona por el método de filtración exterior lo que implica la distribución del flujo de gas alrededor de las mangas y el gas limpio se evacua por un compartimento superior. La temperatura de llegada al filtro de los gases en el gasificador expuesto es aproximadamente 70 °C. El filtro obedece a la metodología de diseño planteada por (Echeverri Londoño, 2008), (Figura 28)

Figura 28

Configuración de filtro de mangas.



La cantidad de cenizas en el gas producido es de 0,5 g/m³ como se indicó anteriormente, al pasar por el ciclón este retiene el 60% de las mismas, es decir que el valor de la concentración de partículas en la corriente gaseosa al entrar al filtro es $C_{par} = 0,2 \text{ g/m}^3$ que corresponde a partículas de tamaño menor a 75µm (Tabla 15). Se pueden observar además los valores tolerables de contaminantes del gas pobre, si se

considera una eficiencia de filtrado del 75%, la cantidad de partículas que tendría el gas filtrado sería del 50 mg/m³ lo cual indicaría que está dentro del rango (Tabla 16).

Tabla 15

Distribución por tamaños del polvo del gas pobre.

Tamaño partículas de polvo [µm]	Porcentaje en el gas %
Más de 1 000	1,7
1 000 – 250	24,7
250 – 102	23,7
102 – 75	7,1
75 – 60	8,3
Menos de 60	30,3
Pérdidas	4,2

Nota. Adaptado de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO, 1993.

Tabla 16

Cantidades tolerables de contaminantes del gas pobre.

Agente	Cantidad
Polvo	Menos de 50 mg/m ³ de gas. Preferentemente 5 mg/m ³ de gas.
Alquitranes	Menos de 500 mg/m ³ de gas.
Ácidos	Menos de 50 mg/m ³ de gas (medido como ácido acético).

Nota. Adaptado de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO, 1993.

Otro parámetro importante es el tiempo de acumulación de partículas, el cual tiene un valor de 16 horas y se refiere al tiempo que puede trabajar el equipo antes de necesitar una

limpieza, en este tiempo el filtro genera una caída de presión de $\Delta P = 143 \text{ mmH}_2\text{O}$.

Es importante considerar que al interior del filtro no se requiere condensación, ya que esta humedad no solo se adhiere a las paredes del mismo sino también a la tela provocando una filtración inadecuada, por lo que el mismo se encuentra aislado térmicamente por una capa de lana de vidrio de 1 in de espesor.

Figura 29

Gasificador downdraft ESPOCH.



2.4. Procedimiento para la determinación de la cantidad de energía obtenida por unidad de biomasa dispuesta

Una vez que se encuentra identificada la biomasa residual de la industria maderera disponible en el cantón Riobamba dispuesta para trabajar en la gasificación, y con finalidad de medir los parámetros de funcionamiento reales del gasificador que son caudales máxicos de agente gasificante en este caso aire y gas pobre producido en base a la capacidad de procesamiento de combustible del gasificador, se debe cumplir con el objetivo de obtener una muestra de gas pobre y finalmente caracterizarlo con una cromatografía de gases en laboratorio, obtener índices de funcionamiento, calcular la eficiencia de gasificación y estos parámetros en conjunto compararlos con estudios contemporáneos de similares características los cuales ayuden a la corroboración de los datos obtenidos.

2.4.1. Materiales y equipos utilizados

Los materiales necesarios para la experimentación son:

- Biomasa forestal: 40kg/h, en pleno funcionamiento del gasificador.
- Carbón: 5kg, para el arranque (opcional).
- Madera trozada o leña: 40kg, para el arranque.

Los equipos necesarios para la experimentación son:

Tabla 17

Equipos e instrumentos para experimentación.

Equipo	Características	Figura
Balanza digital.	Torrey, modelo: PCR series. Capacidad máxima: 20 kg. Apreciación: 0,001 kg. Unidades de medida: kilogramos y libras.	
Detectores de temperatura resistivos RTD.	Tipo: PT 100 Material del RTD: platino Apreciación: 0,01 °C Resistencia a sonda a 100 °C: 100 Ω Rango de medición: 0 a +1250 °C.	
Pirómetro infrarrojo con termocupla.	Oakton, modelo: Infracro 5 WD-35629-40 Precisión: 1% de la lectura Apreciación: 0,2 °C, rango de medición: -32 a +760 °C.	
Dos caudalímetros de placas orificio.	Construidas a través de la Norma NTE INEN ISO 5167.	

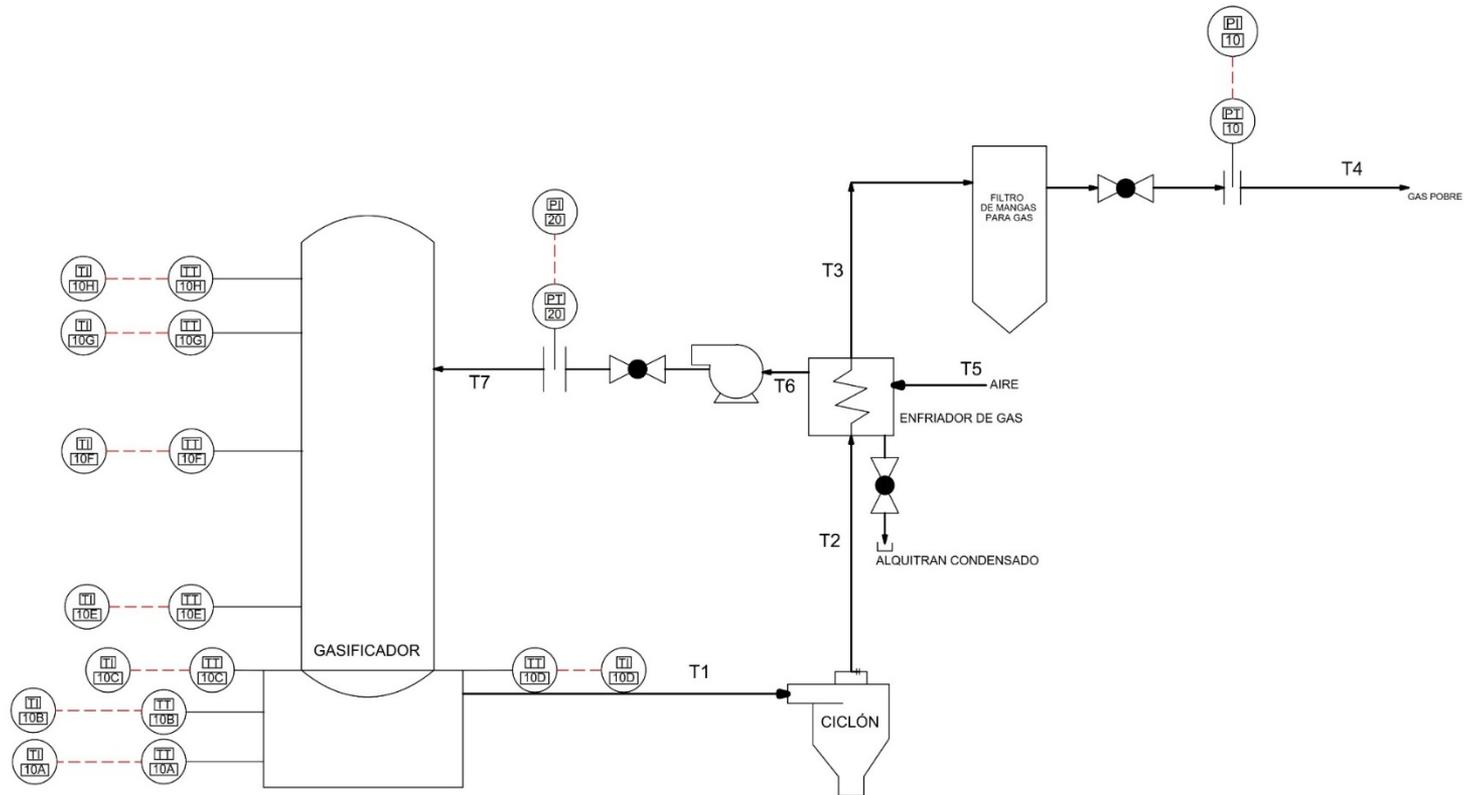
Equipo	Características	Figura
<p>Medidor de presión diferencial digital</p> <p>Designación en diagrama P&ID: PI 10 para el gas pobre producido y PI 20 para el aire.</p>	<p>Manometer, modelo: HT 1890</p> <p>Apreciación: 0,1 cmH_2O</p> <p>Rango de medición: $\pm 140,176 cmH_2O$</p>	
<p>Ventilador centrífugo.</p>	<p>Century tolos modelo: VN-40</p> <p>Diámetro a la descarga: 4in</p> <p>Voltaje de alimentación: 110 V.</p>	

2.4.2. Diagrama P&ID del gasificador downdraft

Un diagrama de tuberías e instrumentación, piping and instrumentation diagram P&ID por sus siglas en inglés, sirve para indicar el flujo del proceso a través de las tuberías y equipos y también el instrumental instalado. La norma que indica los parámetros para la elaboración de estos diagramas es al ISA S5.1.

En el gasificador del caso de estudio, se encuentran instalados 8 puntos para la medición de la temperatura, de estos, 4 corresponden a termocuplas tipo K y 4 corresponden a RTD. Además desde la salida del gas pobre del gasificador se encuentran ubicados puntos específicos para el control de la temperatura a través del pirómetro Oakton, en estos puntos no se hallan instaladas de manera permanente instrumentos de medición y son T1, T2, T3, T4, para el gas pobre y T5, T6 y T7 para el aire.

Figura 30
Diagrama P&ID del gasificador downdraft.



2.4.3. Protocolo de uso y experimentación del gasificador

Se inicia todo el protocolo al Inspeccionar el gasificador compuertas cerradas, tuberías de flujo de aire, suministro de energía al ventilador. Verificación de instrumentos caudalímetros, termocupla y pirómetro.

Registrar el peso de la biomasa residual de la industria de la madera a través de la balanza digital: se preparan porciones de 40 kg cada una para ser suministradas una porción cada hora. Se utilizan para la experimentación residuos donados de madera trozada de eucalipto de dimensiones aproximadas de 4cm x 2cm x 10cm.

Arrancar el gasificador: consiste en el lapso de tiempo que se le da al gasificador para que la mayor parte del equipo adquiera una temperatura de trabajo, en otras palabras, sirve para calentar el conjunto. Este calor se lo obtiene de la combustión completa de la biomasa preferentemente en el hogar durante una hora, que es el intervalo de tiempo recomendado (Basu, 2010).

Para tener una combustión completa se debe agregar la cantidad adecuada de aire, conocida como valor estequiométrico o masa de aire estequiométrico, el mismo que

depende de la composición química del combustible (Basu, 2010).

$$m_{at} = 0,1153 \cdot C + 0,3434 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0,0434 \cdot S \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

m_{at} es la masa de aire estequiométrico en $\frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}$

C, H, O y S es el porcentaje de masa de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre en la correspondientemente en el combustible de uso.

La composición química de biomasa se puede obtener de un análisis de laboratorio para valores exactos del combustible con el que se está tratando, sin embargo, los valores referenciales para varios recursos se enlistan en la Tabla 18.

Tabla 18

Composición de algunos tipos de biomosas en base seca.

Combustible	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	O [%]	Cenizas [%]	U [%]	PCI [MJ/kg]
Eucalipto	49,01	6,02	0,2	0,12	42,38	2,28	8,45	19,53
Pino	53,43	6,64	0,14	0,05	38,87	0,85	-	19,38
Laurel	52,45	6,36	0,4	-	40,13	0,59	10	19,98

Nota. Adaptado de Energy research Centre of the Netherlands, 2012.

Para asegurar la combustión completa del combustible, se agrega una cantidad adicional de aire o un exceso de aire que será el valor real de masa de aire con el que se produce la combustión. Este exceso de aire es requerido por tipo de combustible, la relación entre la masa real de aire y la masa de combustible se conoce como coeficiente de exceso de aire s y los valores que se recomiendan utilizar para combustibles sólidos, líquidos y gaseosos se encuentran en la Tabla 19.

$$s = \frac{m_{ar}}{m_{at}} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde

s es el coeficiente de exceso de aire, adimensional

m_{ar} es la masa de aire real en $\frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}$

Tabla 19

Valores del coeficiente de exceso de aire por tipo de combustible.

Combustibles	Coficiente de exceso de aire s
Sólidos	1,5-2,0
Líquidos	1,1-1,2
Gaseosos	1-1,1

Nota. Adaptado de Márquez Martínez, 2005.

Arrancar el gasificador: finalizada la etapa de arranque el equipo debe comenzar su trabajo produciendo gas pobre, las

condiciones de operación deben ser estables. El aire suministrado como agente gasificante es solo una porción de masa de aire estequiométrico, este porcentaje depende del tipo de gasificador con el cual se esté trabajando. Entonces el requisito de aire para gasificación se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$m_{ag} = m_{at} \times ER \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

m_{ag} es la masa de aire requerido para gasificación en $\frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}$

ER es un parámetro conocido como relación de equivalencia $0,2 < ER < 0,3$, para gasificadores downdraft se recomienda valores de 0,2 a 0,25 (Basu, 2010).

El caudal de ingreso de aire tanto para el arranque como para la puesta en marcha del gasificador, se controla por medio de una válvula de bola, como se puede apreciar en el diagrama P&ID, Figura 30. Con las ecuaciones 2.2 y 2.3 se obtienen las masas de aire real para el arranque y para la gasificación, para transformar estos datos a flujos volumétricos se debe considerar el valor de la densidad del aire en condiciones de trabajo, presión atmosférica en Riobamba y temperatura de aire a la salida del ventilador.

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a} = \frac{m_a \times \dot{m}_b}{\frac{P_{atm}}{R_a \times T_a}} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde:

\dot{V}_a es el caudal de ingreso de aire en m^3/s

\dot{m}_a es el caudal másico de aire en kg/s

ρ_a es la densidad del aire

m_a es la masa de aire real o de gasificación en kg/kg

$\dot{m}_b = 40 \text{ kg}/\text{h}$ es el caudal másico de biomasa para arranque o en gasificación

$P_{atm} = 72875 \text{ Pa}$ es la presión atmosférica en Riobamba

$R_a = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ es la constante particular del aire, (Cengel & Ghajar, 2011).

$T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ en el arranque y $48 \text{ }^\circ\text{C}$ en gasificación es la temperatura a la que sale el aire del ventilador en el arranque y en la gasificación.

De una manera similar se puede identificar el caudal de salida de gas, tomando en cuenta los parámetros de salida del gas.

$$\dot{V}_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g} = \frac{\dot{m}_g}{\frac{P_{atm}}{R_g \times T_g}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

\dot{V}_g es el caudal de salida de gas m³/s

\dot{m}_g es el flujo másico de gas en kg/s

$R_g = 0,3144 \frac{kJ}{kg K}$ es la constante particular del gas

$T_g = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ es la temperatura de salida del gas del filtro.

Registrar las temperaturas y valores de presión diferencial para caudales: usando las termocuplas se mide las temperaturas indicadas T3, T5 y T6. El registro de los valores de caudales se los obtiene mediante los instrumentos PI 10 y PI 20.

Tomar las muestras de gas pobre: después de haber funcionado el gasificador de manera estable durante un período de una hora se procede al muestreo del gas pobre. La muestra de gas pobre se la realiza en bolsas tedlar con capacidad para 3 litros, las cuales están fabricadas con un material químicamente inerte, polivinil fluoruro (PVF), y son específicas para el muestreo de líquidos o gases (Figura 31). La temperatura del fluido de muestra para estas bolsas puede ser hasta 107°C, el tiempo de almacenamiento que resisten puede ser de 24 a 72 horas dependiendo del fluido. La toma se la debe realizar evitando la mezcla con aire circundante del ambiente y se colecta dos bolsas, pues es la cantidad mínima para el análisis en laboratorio.

Figura 31

Bolsa tedlar para muestreo de gas pobre.



Transportar e ingresar a análisis de laboratorio: el análisis cromatográfico del gas se llevó a cabo en la ciudad de Quito en el Departamento de Ingeniería Química Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional, el cambio pequeño de presión atmosférica no incurre en riesgo de daños en la bolsa, por lo que el porcentaje de llenado de las mismas será en su totalidad.

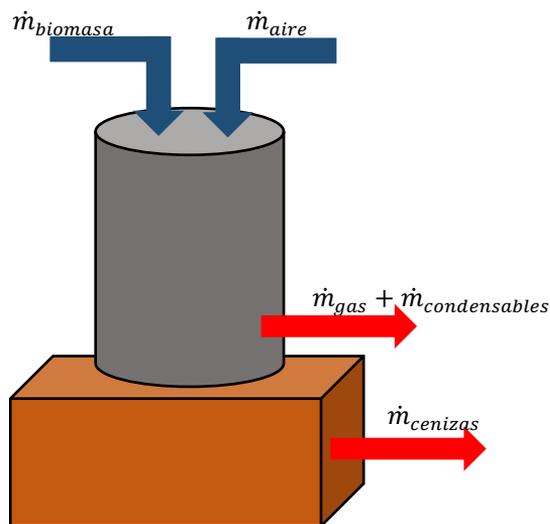
2.5. Balance de masa y energía en la gasificación

La última etapa en el proceso de experimentación es el balance másico y energético para abordar el cálculo de la eficiencia. En el balance másico se utilizan los valores que se obtienen en la prueba de gasificación. Para cada flujo másico de biomasa, aire y gas producido se utilizan los instrumentos balanza digital y caudalímetros detallados anteriormente. Para el caso de los condensados que se receiptan en el enfriador, su

cantidad se la toma por la tubería de purga del enfriador, mientras que el pesaje de las cenizas se lo realiza después que se ha terminado la gasificación y se ha dejado enfriar completamente el equipo al menos 12 horas. La Figura 32 representa esquemáticamente los valores de masa de entrada y salida.

Figura 32

Diagrama de balance de masa en el gasificador.



$$\dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{condensables} + \dot{m}_{cenizas} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

$\dot{m}_{biomasa} = \dot{m}_b = 40 \text{ kg/h}$ es la cantidad de biomasa forestal

$\dot{m}_{aire} = \dot{m}_{ag}$ es el flujo másico de aire para gasificación en kg/h

\dot{m}_{gas} es el flujo másico de gas pobre producido en kg/h

$\dot{m}_{condensables}$ es el flujo másico de condensables producido en kg/h

$\dot{m}_{cenizas}$ es el flujo másico de cenizas producidas en kg/h

El balance de energía se realiza en base a los parámetros experimentales; el diagrama que indica el flujo de energía se presenta en la Figura 33.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{biomasa} PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire} h_{aire} \\ = \dot{m}_{gas} PCI_{gas} + \dot{m}_{gas} h_{gas} \\ + \dot{m}_{cenizas} Cp_{cenizas} (T_{cenizas} - T_{amb}) + \dot{Q}_{perdido} \end{aligned} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

$PCI_{biomasa} = 15,36 \text{ MJ/kg}$ es el poder calorífico inferior de la biomasa. Madera trozada de Eucalipto,

$h_{aire} = 0,32029 \text{ MJ/kg}$ es la entalpía del aire, agente gasificante a 80°C y 72,875kPa, (Anexo 6).

PCI_{gas} es el poder calorífico inferior del gas producido en MJ/kg, se obtiene de los resultados de laboratorio cromatográfico realizados,

$h_{gas} = 1,5338 \text{ MJ/kg}$ es la entalpía del gas pobre a 200 °C 72,875 kPa, en MJ/kg, (Ver cálculo en Anexo 5).

$Cp_{cenizas} = 0,00096 \frac{MJ}{kg K}$ es el calor específico de las cenizas producidas. (Lesme et al., 2008)

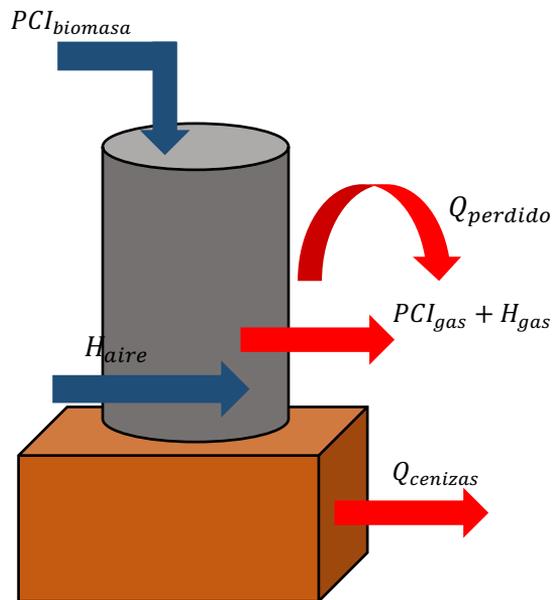
$T_{cenizas} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ es la temperatura de las cenizas

$T_{amb} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ es la temperatura ambiente

$\dot{Q}_{perdido}$ es la tasa de calor perdido en kW

Figura 33

Diagrama de balance de energía en el gasificador.



Para el cálculo del calor perdido se toma en cuenta que esta porción de energía se obtiene de la transferencia de calor

por convección natural desde el cuerpo del gasificador hacia el ambiente.

$$Q_{perdido} = h A_s (T_s - T_{amb}) \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde:

h es el coeficiente convectivo en $W/m K$

$A_s = 6,082 m^2$ es el área de transferencia de calor, cuerpo del gasificador.

$T_s = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ es la temperatura de la superficie, registrada en la etapa experimental, se utiliza el pirómetro Oakton Infrapro 5.

$$h = \frac{Nu k}{Lc} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

Nu es el número de Nusselt, adimensional.

$k = 0,03165 W/m K$ es la conductividad térmica del aire a temperatura fílmica $T_f \frac{T_s + T_{amb}}{2} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ (Anexo 7).

$Lc = 2,2m$ es la longitud característica, altura del cuerpo del gasificador.

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde:

Ra es el número de Rayleigh, adimensional

$Pr = 0,7092$ es el número de Prandt del aire a temperatura fílmica (Anexo 7).

$$Ra = \frac{g \frac{1}{T_f} (T_s - T_{amb}) Lc^3}{\nu^2} Pr \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

$g = 9,79 \frac{m}{s^2}$ es el valor de la gravedad

$\nu = 2,41 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$ es la viscosidad cinemática del aire a temperatura fílmica (Anexo 7).

2.6. Eficiencia del proceso de gasificación

La eficiencia en un proceso de gasificación tiene dos connotaciones, que resultan del empleo que se le otorgue al gas producido, la eficiencia en frío y la eficiencia en caliente (Basu, 2010). La primera se le conoce también como eficiencia mecánica, y se utiliza sí el gas generado va a ser utilizado en motores de combustión, es un gas que debe ser enfriado. La

segunda forma de eficiencia se le utiliza cuando el gas va a ser combustionado directamente después de ser producido, este gas no ha sido enfriado, como se puede ver en las Ecuaciones 2.13 y 2.14 la diferencia en el cálculo está en considerar o no el valor de la entalpia del gas.

$$\eta_F = \frac{\dot{m}_{gas} PCI_{gas}}{\dot{m}_{biomasa} PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire} h_{aire}} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde:

η_F es la eficiencia en frío del proceso de gasificación en %

$$\eta_C = \frac{\dot{m}_{gas} PCI_{gas} + \dot{m}_{gas} h_{gas}}{\dot{m}_{biomasa} PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire} h_{aire}} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde:

η_C es la eficiencia en caliente del proceso de gasificación en %

Los cálculos de estos valores se exponen en el *Capítulo 3 sección 3.1.7 Cálculo de la energía aprovechable de la biomasa residual de la madera.*

Conclusiones del capítulo

La encuesta fue diseñada para obtener datos de información del establecimiento y datos técnicos para la investigación como: tipo de materia prima, cantidad y destino de desperdicios y residuos, gasto o redito económico implicado en los residuos y si estará dispuesto a donarlo para fines energéticos e investigativos a la ESPOCH. Posteriormente se tabulan los datos y se realiza el proceso estadístico descriptivo para conocer la cantidad de masa total que se dispone de biomasa residual forestal.

Capítulo 3

Posibilidades y retos del proyecto



Posibilidades y retos del proyecto

3. Factores a considerar para el levantamiento de información

En este capítulo se exponen los valores obtenidos a través del censo y producto de la experimentación con lo cual se logra identificar la cantidad, localización y tipo de biomasa forestal residual de la industria maderera disponible para fines energéticos en el cantón Riobamba, así como también la cantidad de energía útil a través de la utilización del gasificador downdraft del caso de estudio, para ello ha sido necesario pruebas experimentales, análisis de composición del gas y balances másico y energético. En la sección del libro se analiza económicamente la viabilidad implementación de una planta de gasificación con la adecuación de una planta piloto en la ESPOCH y la identificación de los usos potenciales del gas combustible obtenido.

3.1. Derivaciones

3.1.1. Información de los establecimientos encontrados

La descripción del nombre del propietario, nombre del establecimiento y dirección se encuentra detalladamente en el Anexo 8. La cantidad total de establecimientos encontrados en el cantón Riobamba que trabajan con madera es 173, de los cuales 151 proveen información y 22 establecimientos que no han participado en el censo, por celo y resistencia de los propietarios a detallar información de sus actividades, por razones socioeconómicas. Los resultados se expresan en la Tabla 20

Tabla 20

Cantidad de establecimientos madereros detectados en el cantón Riobamba, año 2016.

SECTOR	Proveen Información	NO Proveen Información	Total
PERIFERIA URBANA Sectores del 1 al 24	135 (78,03%)	21 (12,14%)	156 (90,17%)
PERIFERIA RURAL Sectores del 25 al 35	16 (9,25%)	1 (0,58%)	17 (9,83%)
TOTALES	151 (87,28%)	22 (12,72%)	173

Esta Tabla la podemos apreciar en la Figura 34 y en la Figura 35 en modos de diagramas de barras y tortas.

Figura 34

Cantidad de establecimientos encontrados que proveen o no información por sector.

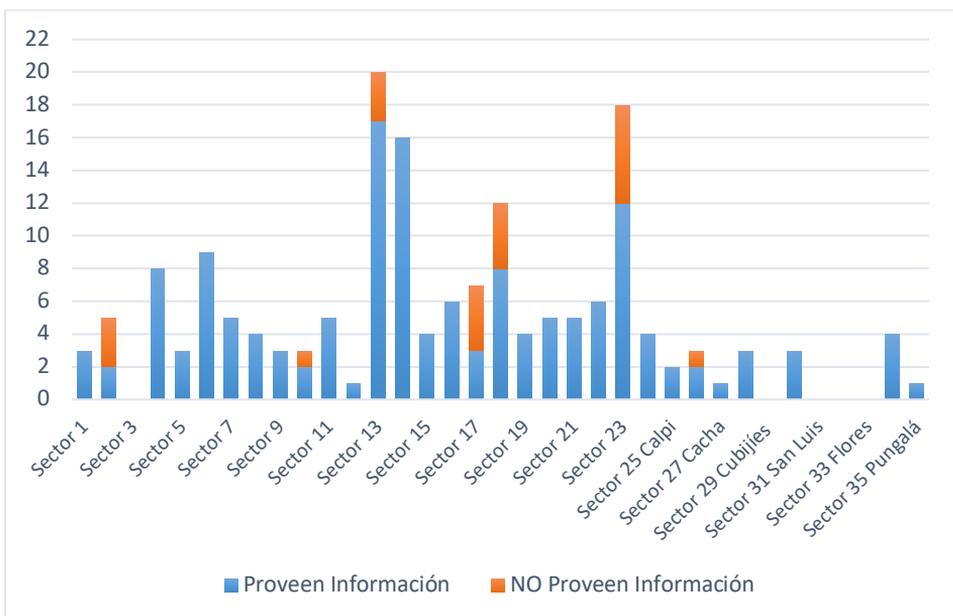
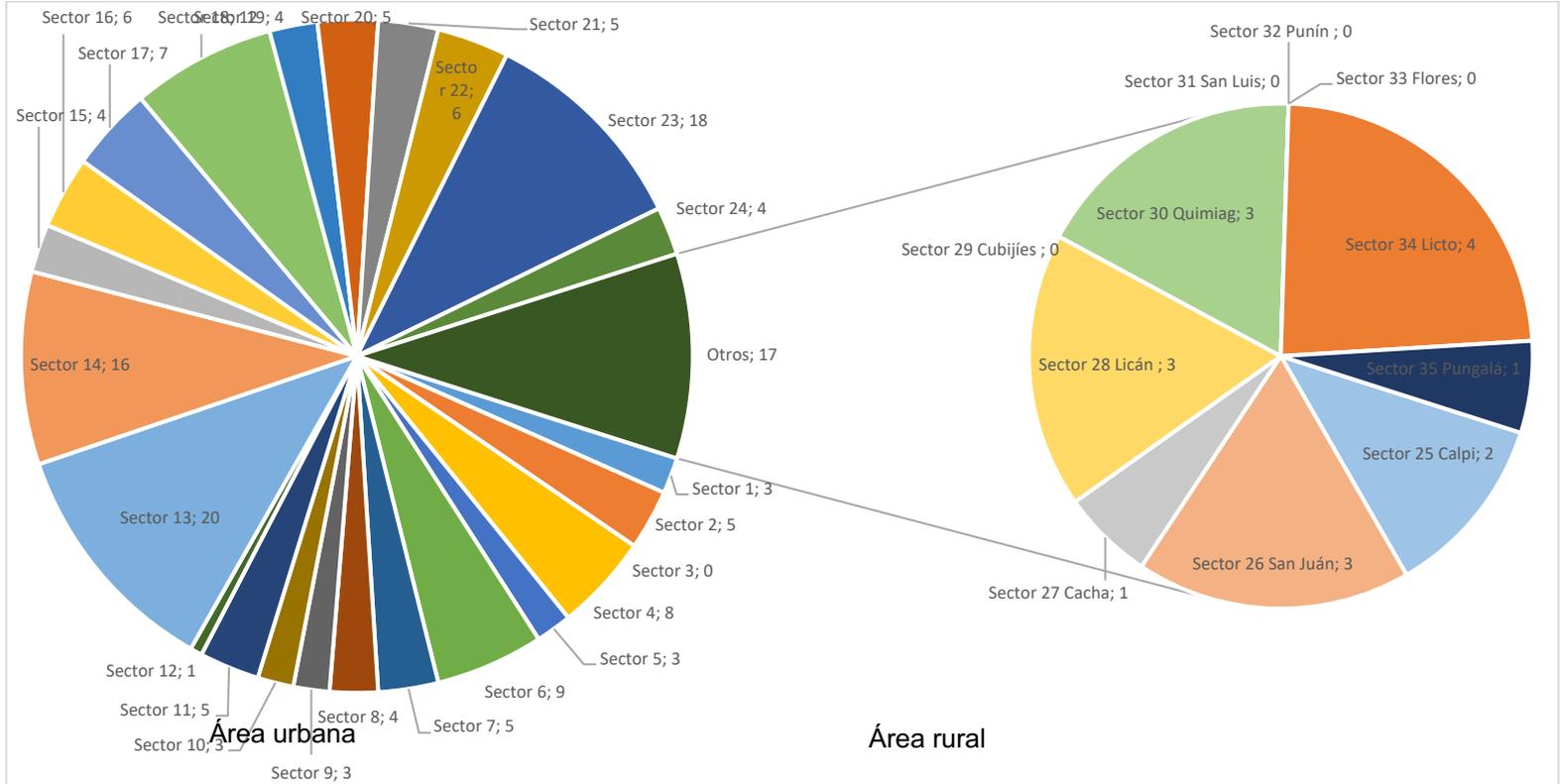


Figura 35

Establecimientos encontrados en el área urbana y rural [u].



En la Figura 34 se puede observar que en un sector cualquiera el número de establecimientos que no proveen información es proporcional al número total de establecimientos en el mismo. La Figura 35 muestra que la cantidad de establecimientos que trabajan con madera en el sector rural es pequeña comparada con el sector urbano.

3.1.2. Cantidad y tipo de materia prima presente en cada uno de los establecimientos madereros

Al realizar la encuesta, las cantidades de materia prima se las obtiene en diferentes unidades de volumen tablón, tabla, m³ y planchas. Para el área urbana sectores del 1 al 24 y para el área rural sectores del 25 al 35, se obtiene el siguiente primer resultado, Tabla 21 y Tabla 22 respectivamente:

Tabla 21

Volúmenes de materia prima de los establecimientos madereros en el área urbana.

Especie	Semana	Unidades	Mes	Unidades
Aguano	100	Tablón	400	Tablón
Canelo	162	Tablón	648	Tablón
Canelo	50	Tabla	200	Tabla
Caoba	50	Tabla	200	Tabla
Caoba	0,002	m ³	0,008	m ³
Capulí	5	Tabla	20	Tabla
Capulí	0,002	m ³	0,008	m ³
Cedro	34,5	Tablón	138	Tablón
Cedro	43	Tabla	172	Tabla

Especie	Semana	Unidades	Mes	Unidades
Seique	422	Tablón	1688	Tablón
Chanul	112,5	Tablón	450	Tablón
Chanul	35,300	m ³	141,2	m ³
Chonta	0,020	m ³	0,08	m ³
Chuncho	146	Tablón	584	Tablón
Chuncho	2	m ³	8	m ³
Ciprés	7	m ³	28	m ³
Copal	15	Tablón	60	Tablón
Eucalipto	1867,5	Tablón	7470	Tablón
Eucalipto	2279	Tabla	9116	Tabla
Eucalipto	307,750	m ³	1231	m ³
Guayacán	3	Tablón	12	Tablón
Laurel	3213,8	Tablón	12855	Tablón
Laurel	136,5	Tabla	546	Tabla
Laurel	12,500	m ³	50	m ³
Marfil	50	Tablón	200	Tablón
Mascarey	175,5	Tablón	702	Tablón
Mascarey	0,020	m ³	0,08	m ³
Nogal	0,002	m ³	0,008	m ³
Pigue	494,8	Tablón	1979	Tablón
Pigue	32,5	Tabla	130	Tabla
Pino	1032,9	Tablón	4131,6	Tablón
Pino	20	Tabla	80	Tabla
Pino	274,000	m ³	1096	m ³
Sapeli	4	Tablón	16	Tablón
Teca	150	Tablón	600	Tablón
Madera en general	488	Tablón	1952	Tablón
Madera en general	162,5	Tabla	650	Tabla
Tabla de monte	550	Tabla	2200	Tabla
Aglomerado	101,4	Plancha	405,5	Plancha
Laminado	200	Plancha	800	Plancha
MDF	427	Plancha	1708	Plancha
MDF	175,680	m ³	702,72	m ³
MDP	94	Plancha	376	Plancha

Especie	Semana	Unidades	Mes	Unidades
Melamínico	11	Plancha	44	Plancha
Melamínico	0,030	m ³	0,12	m ³
Triplex	20,000	m ³	40,4	m ³
Triplex	531	Plancha	2124	Plancha

Tabla 22

Volúmenes de materia prima de los establecimientos madereros en el área rural.

Especie	Semana	Unidades	Mes	Unidades
Chanul	1	Tablón	4	Tablón
Ciprés	0,5	Tablón	2	Tablón
Copal	38	Tablón	152	Tablón
Eucalipto	54,75	Tablón	219	Tablón
Eucalipto	102,5	Tabla	410	Tabla
Laurel	13,5	Tablón	54	Tablón
Pino	59	Tablón	236	Tablón
MDF	4,5	Plancha	18	Plancha

Ya hablamos en apartados anteriores de la necesidad de estandarización y de homogenización de unidades de volumen de las tablas anteriormente expuestas, la Tabla 23 que se muestra en la siguiente página es una referencia para expresar todos los datos en metros cúbicos. El objetivo es determinar la masa de esta materia prima, para lo cual también es necesario conocer la densidad de las distintas especies forestales en el Ecuador como se expone en una de las columnas de las Tabla 24 y 25 (Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE, 2014). La densidad es una propiedad física de la madera que para este

estudio se considera seca al aire con una humedad de equilibrio de la madera valor medio anual 14,1% para Riobamba. (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2015).

Las cantidades estimadas de materia prima en unidades de masa toneladas (t), en un intervalo de tiempo de una semana ya que de esta manera fue como se encuestaron a los establecimientos madereros; los siguientes resultados estarán en función de este mismo intervalo.

Tabla 23

Cantidad de materia prima total de los establecimientos madereros en el área urbana.

Especie	Cantidad m ³ /semana	Densidad ρ [kg/m ³]	Masa m [kg]	Masa m [t]
Eucalipto	383,526	720	276139,0	276,14
Pino	300,281	490	147137,7	147,14
Laurel	95,206	850	80925,4	80,93
Chanul	38,135	840	32033,4	32,03
Madera en general	14,345	720	10328,5	10,33
Pigue	12,877	650	8370,2	8,37
Seique	10,634	520	5529,9	5,53
Ciprés	7,000	530	3710,0	3,71
Tabla de monte	6,930	500	3465,0	3,47
Chuncho	5,679	550	3123,6	3,12
Canelo	4,712	480	2262,0	2,26
Mascarey	4,443	770	3420,8	3,42
Teca	3,780	610	2305,8	2,31
Aguano	2,520	810	2041,2	2,04
Cedro	1,411	520	733,8	0,73
Marfil	1,260	500	630,0	0,63

Caoba	0,632	560	353,9	0,35
Copal	0,378	700	264,6	0,26
Sapeli	0,101	500	50,4	0,05
Guayacán	0,076	880	66,5	0,07
Capulí	0,065	850	55,3	0,06
Chonta	0,020	500	10,0	0,01
Nogal	0,002	640	1,3	0,00
TOTAL MADERA	894,014		582958,2	582,96
MDF	215,818	650	140281,7	140,28
Triplex	43,895	575	25239,6	25,24
Laminado	18,800	650	12220,0	12,22
Aglomerado	9,529	650	6194,0	6,19
MDP	8,836	659	5822,9	5,82
Melamínico	1,064	650	691,6	0,69
TOTAL PANELES	297,942		190449,9	190,45
TOTAL MADERA+TOTAL PANELES			773408,1	773,41

Tabla 24

Cantidad de materia prima total de los establecimientos madereros en el área rural.

Especie	Cantidad m³/semana	Densidad ρ [kg/m³]	Masa m [kg]	Masa m [t]
Eucalipto	2,671	720	1923,3	1,92
Pino	1,487	490	728,5	0,73
Copal	0,958	700	670,3	0,67
Laurel	0,340	850	289,2	0,29
Chanul	0,025	530	13,4	0,01
Ciprés	0,013	840	10,6	0,01
TOTAL MADERA	5,494	688,33	3635,2	3,64
MDF	0,423	650	274,95	0,27
TOTAL PANELES	0,423		274,95	0,27
TOTAL MADERA+TOTAL PANELES			3910,2	3,91

Tabla 25

Cantidad de materia prima total de los establecimientos madereros en el catón Riobamba.

Especie	Cantidad m³/semana	Densidad ρ [kg/m³]	Masa m [kg]	Masa m [t]
Eucalipto	386,198	720	278112,3	278,11
Pino	301,768	490	147915,3	147,92
Laurel	95,547	850	81214,6	81,21
Chanul	38,160	840	32054,6	32,05
Madera en general	14,345	720	10328,5	10,33
Pigue	12,877	650	8370,2	8,37
Seique	10,634	520	5529,9	5,53
Ciprés	7,013	530	3716,7	3,72
Tabla de monte	6,930	500	3465,0	3,47
Chuncho	5,679	550	3123,6	3,12
Canelo	4,712	480	2262,0	2,26
Mascarey	4,443	770	3420,8	3,42
Teca	3,780	610	2305,8	2,31
Aguano	2,520	810	2041,2	2,04
Cedro	1,411	520	733,8	0,73
Copal	1,336	500	667,8	0,67
Marfil	1,260	560	705,6	0,71
Caoba	0,632	700	442,4	0,44
Sapeli	0,101	500	50,4	0,05
Guayacán	0,076	880	66,5	0,07
Capulí	0,065	850	55,3	0,06
Chonta	0,020	500	10,0	0,01
Nogal	0,002	640	1,3	0,00
TOTAL MADERA	899,508	638,7	586593,3	586,59

Especie	Cantidad m³/semana	Densidad ρ [kg/m³]	Masa m [kg]	Masa m [t]
MDF	216,241	650	140556,7	140,56
Triplex	43,895	575	25239,6	25,24
Laminado	18,800	650	12220,0	12,22
Aglomerado	9,529	650	6194,0	6,19
MDP	8,836	659	5822,9	5,82
Melamínico	1,064	650	691,6	0,69
TOTAL PANELES	298,365	639	190724,8	190,72
TOTAL MADERA+TOTAL PANELES			777318,1	777,32

En las Figuras 36 y 37 se puede apreciar gráficamente la totalidad de materia prima procesada en el cantón. Tanto para el sector urbano como para el sector rural, las unidades se encuentran expresadas en toneladas y metros cúbicos correspondientemente a cada figura en un intervalo de tiempo de una semana.

Una evidencia que salta a la vista es que la madera de eucalipto y pino son las más comercializadas tanto en el sector urbano como en el sector rural, superando fácilmente el 50% de toda la materia prima utilizada. En el caso de los paneles de madera, el MDF es el más comúnmente utilizado. Ahora si se observa la cantidad de materia prima procesada en el sector rural y se la compara con aquella del sector urbano, esta se relega a un valor muy pequeño, 3,91 t frente a 773,41 t.

Figura 36

Cantidad de materia prima de la industria maderera procesada por especies en el cantón Riobamba área urbana y rural [t/semana].

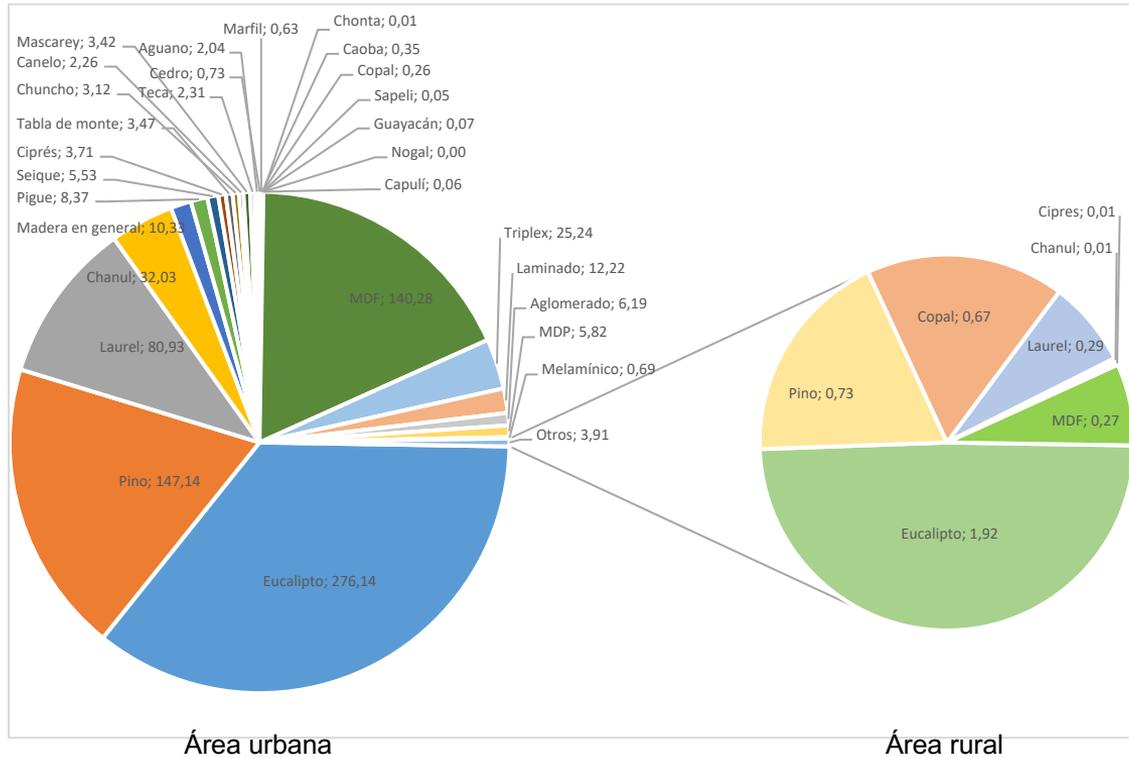
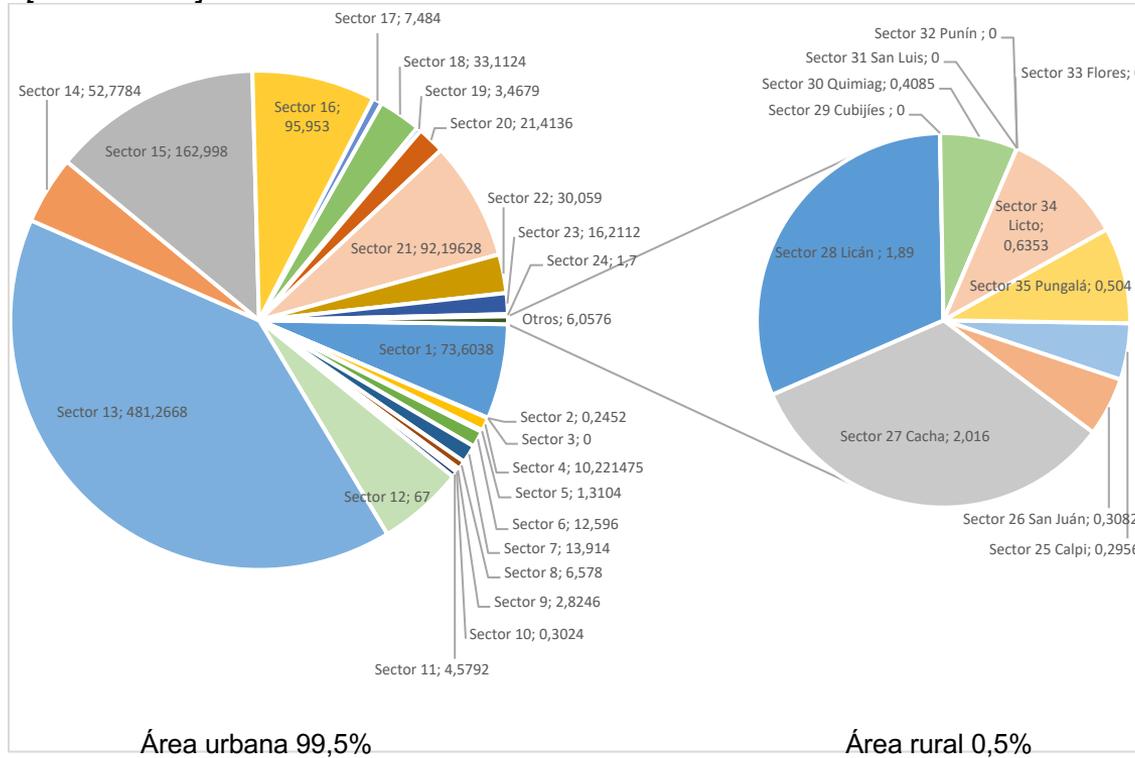


Figura 37

Cantidad de materia prima de la industria maderera procesada por sectores en el cantón Riobamba área urbana y rural [m³/semana].



3.1.3. Cantidad y tipo de residuos forestales de la industria maderera

Identificadas las especies que intervienen en la industria maderera del cantón Riobamba y las cantidades tanto volumétricas como máscas que representan cada una de ellas se procede al siguiente paso en función de la encuesta realizada, el cual es identificar la cantidad y tipo de residuos generados por esta actividad. Las personas encuestadas reconocen 6 tipos de residuos, véase la Figura 36, aserrín, viruta, madera trozada, leña, corteza y polvo de viruta; e identifican el volumen de los residuos en dos tipos de unidades de medida, en sacos comerciales y metros cúbicos, como se indicó en el capítulo anterior un saco comercial equivale a $0,064\text{m}^3$; con este valor se homogeniza todas las cantidades adquiridas de los diferentes sectores en un intervalo de tiempo de una semana (Tabla 26 y Figura 38).

Los metros cúbicos apuntados para cada residuo forestal de industria maderera se corresponden a un valor de densidad aparente individual debido a sus características, como se pudo explicar en el Capítulo 2. Se debe entonces transformar estos valores de volúmenes de residuo forestal a metros cúbicos de madera rolliza a través de los factores de conversión que se muestran en la Figura 20 y en las Tablas 10 y 11. Aquellos

factores que son necesarios para esta investigación, se resumen en la Tabla 27.

Tabla 26

Volúmenes de residuos forestales de industria maderera generados en el cantón Riobamba por sectores.

m ³ /semana SECTOR	TIPO DE RESIDUO					
	Aserrín	Viruta	Madera Trozada	Leña	Corteza	Polvo
Sector 21	45,904	5,016	3	0,0077	22,512	0
Sector 13	5,216	52,216	0,128	0	0,304	0
Sector 14	3,444	25,892	12,88	0	0	0
Sector 16	14,524	10,024	0	5,14	0	0
Sector 17	6,656	14,72	0	0	0	0
Sector 1	1,024	3,84	5	5	0	0
Sector 6	4,032	1,216	1,92	0	0	0
Sector 22	2,528	1,632	2,338	0	0	0
Sector 23	2,992	0,416	2,048	0,576	0	0
Sector 8	3,008	2,24	0	0	0	0
Sector 18	2,794	0,16	2,058	0	0	0
Sector 5	0,448	3,576	0	0	0	0
Sector 15	1,728	0,384	1,568	0	0	0
Sector 20	1,472	0,768	1,28	0	0	0
Sector 7	2,816	0	0,384	0	0	0
Sector 9	1,536	0,64	0,64	0	0	0
Sector 4	1,472	0,704	0	0,576	0	0
Sector 28 Licán	0,96	0	0	0,64	0	0
Sector 19	0,832	0,528	0	0,096	0	0
Sector 12	0,576	0	0,768	0	0	0
Sector 27 Cacha	0	0,64	0	0	0	0
Sector 11	0,496	0	0	0	0	0,096
Sector 24	0,384	0,192	0	0	0	0
Sector 34 Licto	0,16	0,144	0	0	0	0
Sector 25 Calpi	0,096	0,08	0	0	0	0

m ³ /semana SECTOR	TIPO DE RESIDUO					
	Aserrín	Viruta	Madera Trozada	Leña	Corteza	Polvo
Sector 30 Quimiag	0,096	0	0,064	0	0	0
Sector 2	0,144	0	0	0	0	0
Sector 35 Pungalá	0,064	0,064	0	0	0	0
Sector 10	0,08	0	0	0	0	0
Sector 26 S. Juan	0,032	0	0	0	0	0
Sector 3	0	0	0	0	0	0
Sector 29 Cubijies	0	0	0	0	0	0
Sector 31 S. Luis	0	0	0	0	0	0
Sector 32 Punín	0	0	0	0	0	0
Sector 33 Flores	0	0	0	0	0	0
TOTAL	105,51	125,09	34,08	12,04	22,82	0,1
					TOTAL	299,63

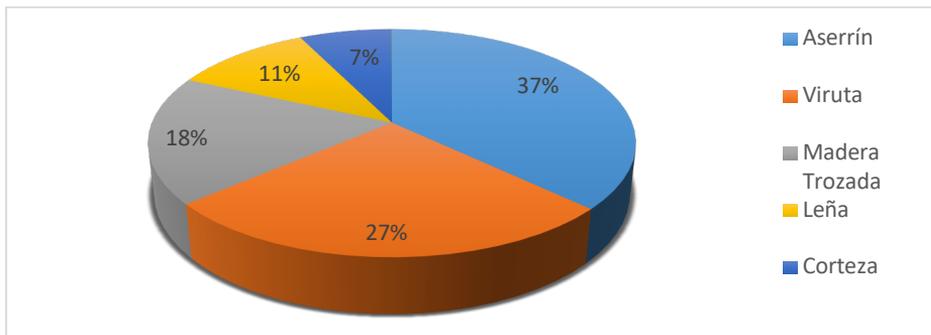
Tabla 27

Resumen factores de conversión para residuos forestales de industria maderera.

RESIDUO FORESTAL	FACTOR	UNIDAD m ³ de Madera rolliza	CARACTERISTICA
Viruta	0,2	m ³	Suelta
Aserrín	0,33	m ³	Suelto
Corteza	0,3	m ³	Suelta
Madera trozada	0,5	m ³	Suelta
Leña	0,85	m ³	Leños apilados (25-30cm)
Polvo de viruta	0,33	m ³	Suelto

Figura 38

Porcentajes de residuos forestales producidos por la actividad maderera en el cantón Riobamba en función del volumen.



Como se puede observar en la Figura 37 los desperdicios que más se generan de la actividad maderera son el aserrín, la viruta y la madera trozada. En conjunto representa más de 80% de todos los desperdicios generados.

Obtenidos los volúmenes de residuos forestales de industria maderera generados como metros cúbicos de madera rolliza se puede obtener el valor de la masa que representan a través de la densidad real. Evidentemente los residuos han sido generados por el procesamiento de una diversidad de materia prima en los establecimientos, para determinar la densidad aproximada de estos se calcula la densidad media ponderada de las especies forestales que se procesan en el cantón Riobamba con la Ecuación 3.1. Los resultados de la masa de residuos forestales de industria maderera por sector se detallan en la Tabla 28.

$$\bar{\rho} = \frac{\sum \rho_i \times x_i}{\sum x_i} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

$\bar{\rho}$ es la densidad media ponderada de las especies forestales en $\frac{kg}{m^3}$

ρ_i es la densidad de la especie forestal i en $\frac{kg}{m^3}$

x_i es el valor porcentual de la especie forestal i en %

$$\bar{\rho} = 652,07 \frac{kg}{m^3}$$

Tabla 28

Masa de residuos forestales de industria maderera generados en el cantón Riobamba.

t/semana	TIPO DE RESIDUO						Total
	SECTOR	Aserrín	Viruta	Madera Trozada	Leña	Corteza	
Sector 21	9,878	0,654	0,978	0,004	4,404	0,000	15,898
Sector 13	1,122	6,810	0,042	0,000	0,059	0,000	8,023
Sector 14	0,741	3,377	4,199	0,000	0,000	0,000	8,307
Sector 16	3,125	1,307	0,000	2,849	0,000	0,000	7,271
Sector 1	1,432	1,920	0,000	0,000	0,000	0,000	3,347
Sector 17	0,220	0,501	1,630	2,771	0,000	0,000	5,118
Sector 23	0,868	0,159	0,626	0,000	0,000	0,000	1,647
Sector 6	0,544	0,213	0,762	0,000	0,000	0,000	1,515
Sector 22	0,644	0,054	0,668	0,319	0,000	0,000	1,685
Sector 8	0,647	0,292	0,000	0,000	0,000	0,000	0,939
Sector 18	0,601	0,021	0,671	0,000	0,000	0,000	1,293
Sector 4	0,096	0,466	0,000	0,000	0,000	0,000	0,563
Sector 5	0,372	0,050	0,511	0,000	0,000	0,000	0,933

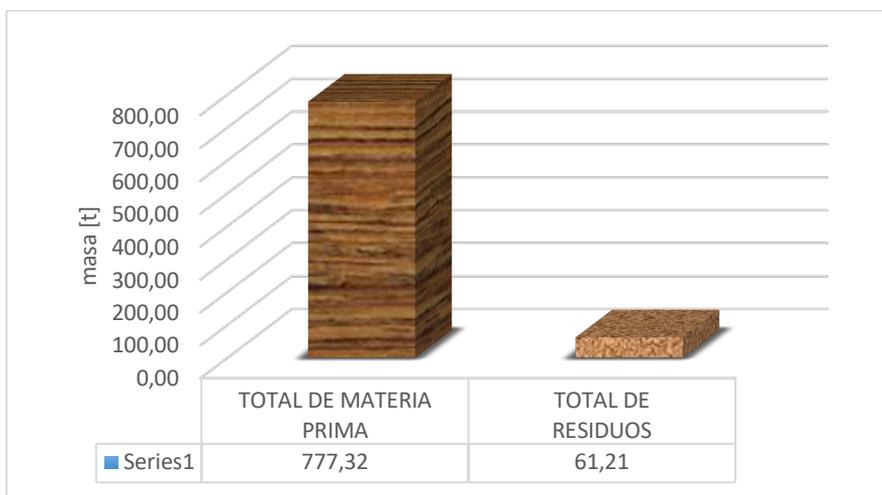
t/semana	TIPO DE RESIDUO						Total
	SECTOR	Aserrín	Viruta	Madera Trozada	Leña	Corteza	
Sector 15	0,317	0,100	0,417	0,000	0,000	0,000	0,834
Sector 20	0,606	0,000	0,125	0,000	0,000	0,000	0,731
Sector 9	0,331	0,083	0,209	0,000	0,000	0,000	0,623
Sector 7	0,317	0,092	0,000	0,319	0,000	0,000	0,728
Sector 28 Licán	0,207	0,000	0,000	0,355	0,000	0,000	0,561
Sector 19	0,179	0,069	0,000	0,053	0,000	0,000	0,301
Sector 12	0,124	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000	0,374
Sector 11	0,000	0,083	0,000	0,000	0,000	0,000	0,083
Sector 24	0,107	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,127
Sector 27 Cacha	0,083	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,108
Sector 34 Licto	0,034	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,053
Sector 25 Calpi	0,021	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031
Sector 30 Quimiag	0,021	0,000	0,021	0,000	0,000	0,000	0,042
Sector 2	0,031	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031
Sector 35 Pungalá	0,014	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022
Sector 10	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017
Sector 26 S. Juan	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007
Sector 3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sector 29 Cubijes	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sector 31 S. Luis	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sector 32 Punín	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sector 33 Flores	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	22,705	16,31	11,110	6,671	4,463	0,021	61,214

En la Tabla 28, se indicó el porcentaje de generación de residuos por el procesamiento de la madera considerando la totalidad del árbol. En el caso del cantón Riobamba la relación de generación de residuos forestales en función de la materia

prima proveniente de las especies es del 7,8%, como se puede apreciar en la Figura 39.

Figura 39

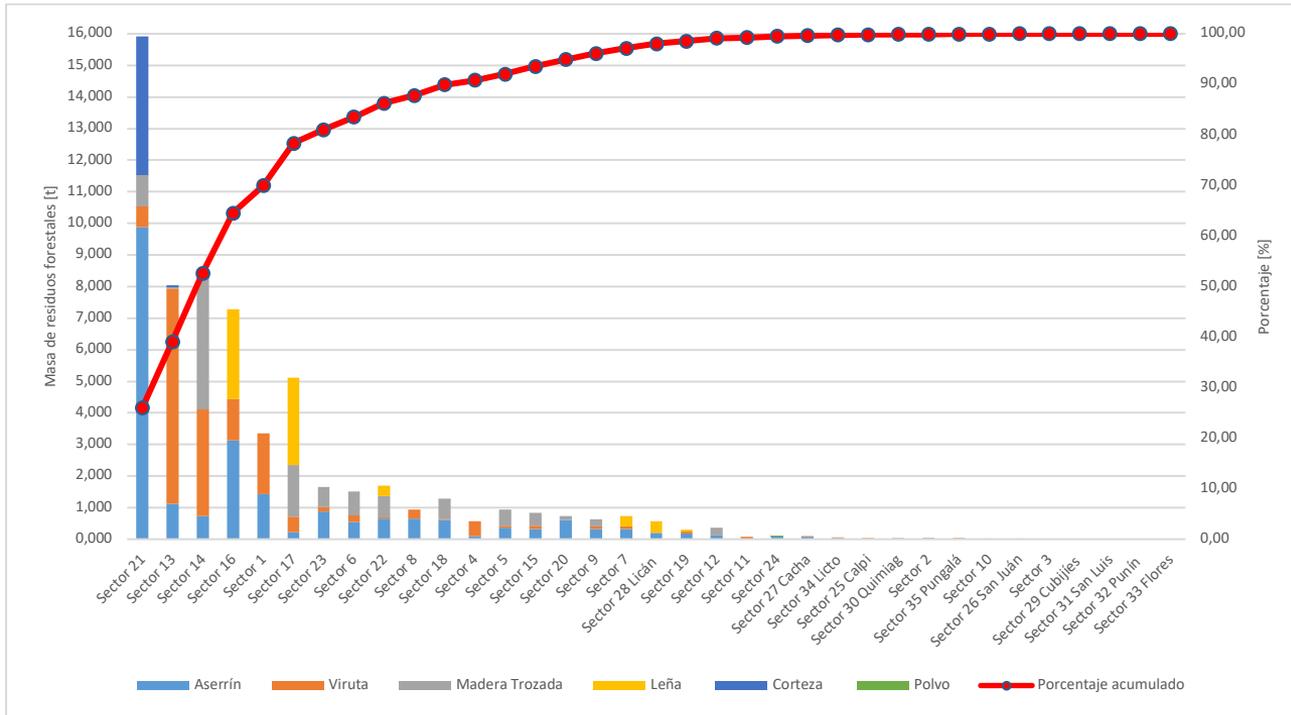
Materia prima vs residuos forestales de industria maderera generados.

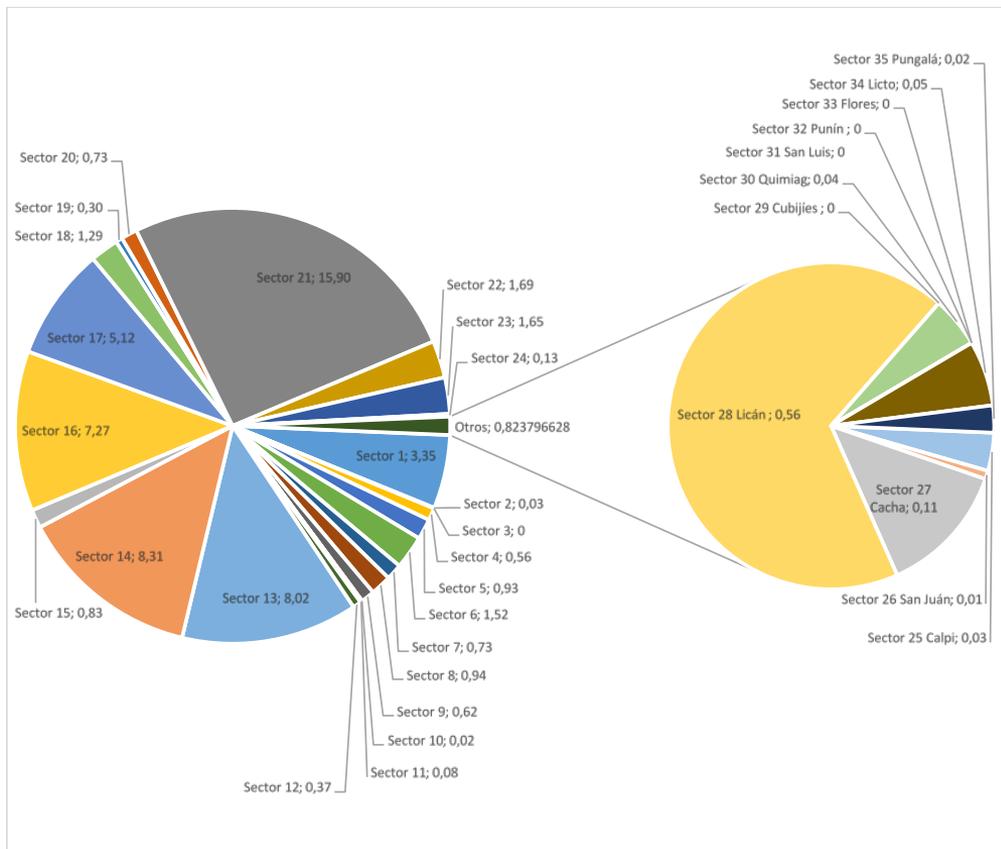


La Figura 40 representa gráficamente la participación de los 35 sectores en la generación de residuos forestales. En el diagrama de Pareto se observa que los sectores de mayor incidencia son: 21, 13, 14, 16, 1, 17 y 23; estos siete sectores en conjunto representan el 81,05% de residuos forestales en el cantón. La participación del sector rural es muy pequeña, en conjunto las 11 parroquias rurales representan el 1,3% de los residuos.

Figura 40

Masa de residuos forestales de industria maderera generados en el cantón Riobamba por sectores [t/semana].





3.1.4. Destino final de los residuos forestales de industria maderera

Los residuos forestales generados en el cantón Riobamba tienen poco o ningún aprovechamiento postproducción. En las encuestas los entrevistados indicaron que algunos de los destinos de los residuos son la venta, el desecho, la quema, algunos lo regalan, otros lo usan como abono, entre otros usos, incluido como combustible. La quema se la realiza como una forma alterna de desecharlos, lo que provoca contaminación y no se aprovecha nada de su potencial. Cuando los propietarios regalan los residuos estos se destinan principalmente para adecuaciones de animales. Otros usos consisten en la fabricación de ladrillos, relleno de terrenos. El uso como combustible es rudimentario, en muchos casos es para la cocción de alimentos. La Tabla 29 indica las cantidades de los residuos forestales para cada uno de estos usos.

Tabla 29

Destino final de los residuos forestales de industria maderera en el cantón Riobamba.

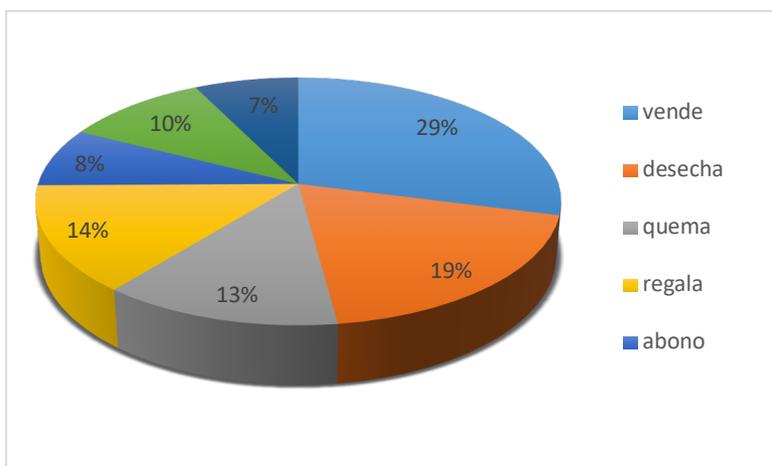
DESTINO	Vende	Desecha	Quema	Regala	Abono	Usos Varios	Uso Combustión	Total
Porcentaje [%]	29,0	18,9	12,9	14,0	7,7	10,1	7,3	100,0
Masa [t]	17,7	11,6	7,9	8,6	4,7	6,2	4,5	61,214

En la Figura 41 se puede notar que en el cantón Riobamba los establecimientos tratan de vender sus residuos generados representando el 29%, pero el segundo uso que representa el 19% es el desecho y algo similar es la quema con el 13%. Existe posibilidad de disponibilidad de recurso biomásicos sin que afecten a los establecimientos.

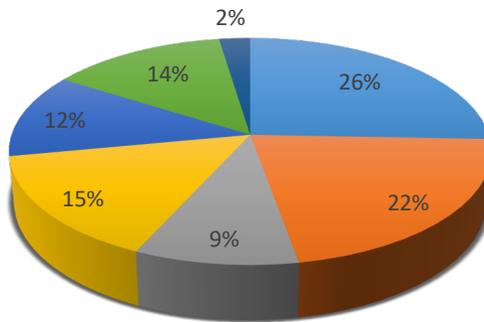
De igual forma, el conjunto de diagramas de pastel que conforman la Figura 41 representan los usos que se les otorga a cada uno de los residuos post procesamiento de la madera. En casi todos los casos sucede lo mismo, los dos usos más importantes son la venta y el desecho a excepción de la madera trozada donde su principal utilización es la quema y también el uso como combustible.

Figura 41

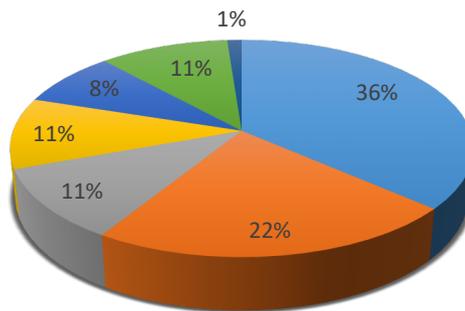
Destino final de los residuos forestales de industria maderera en el cantón Riobamba.



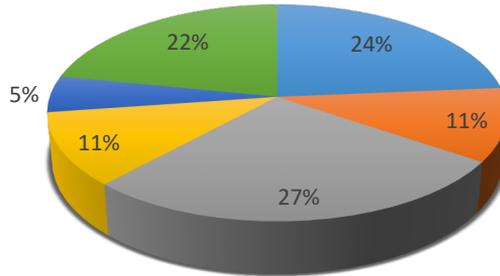
Aserrín



Viruta

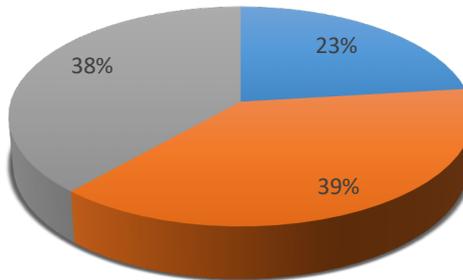


Madera Trozada



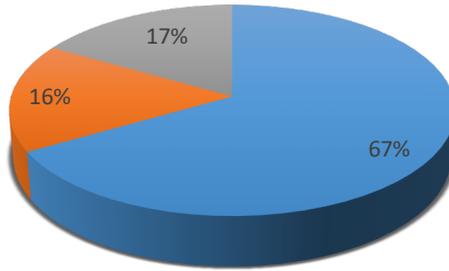
■ vende ■ desecha ■ quema
■ regala ■ usos varios ■ uso combustion

Leña



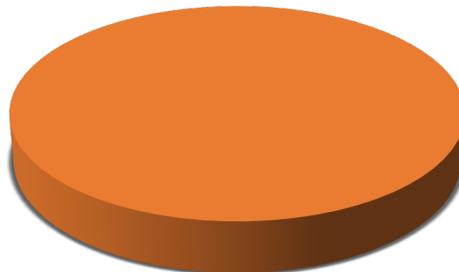
■ vende ■ regala ■ uso combustion

Corteza



■ vende ■ quema ■ regala

Polvo de viruta



100%

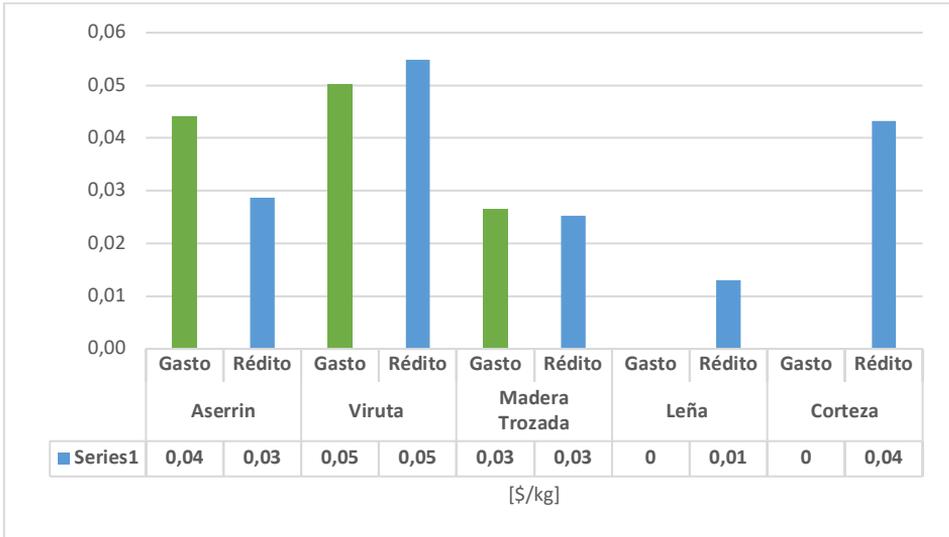
■ desecha

3.1.5. Implicación económica de los residuos forestales de industria maderera para los establecimientos

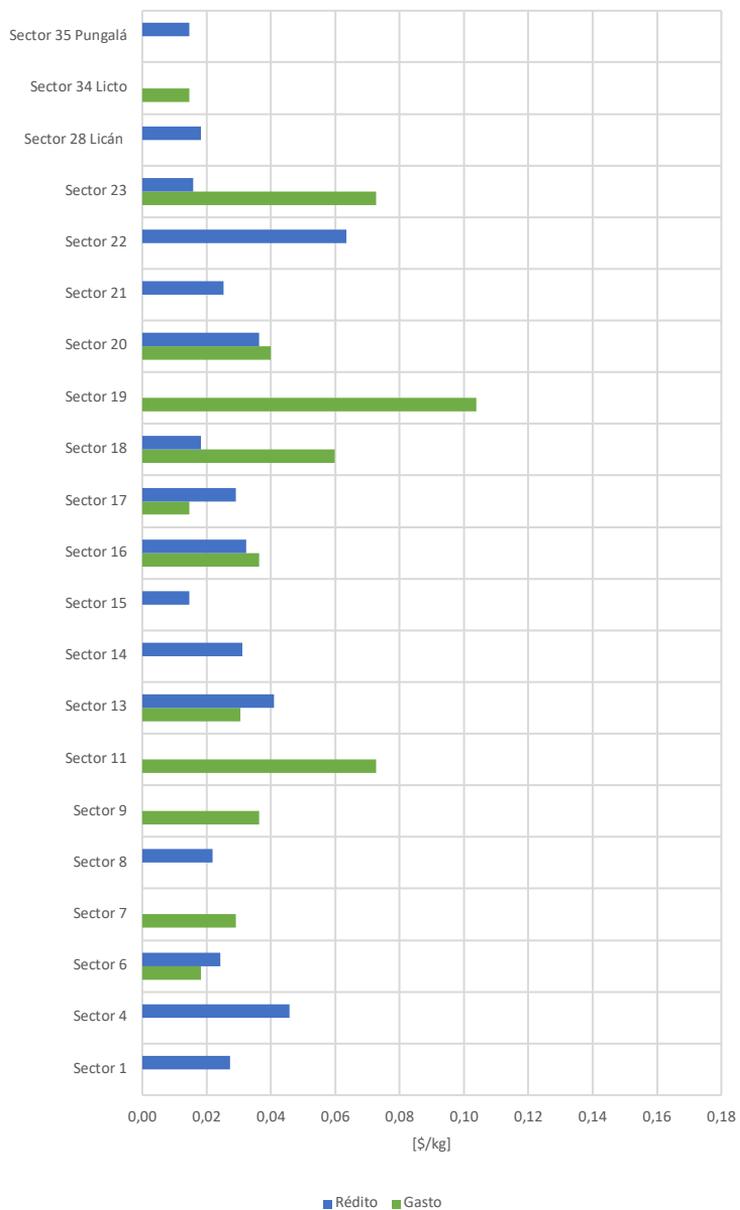
Analizar los costos industria maderera es una tarea interesante para colaborar con el desarrollo financiero de la región. Podemos comprender que hay una ganancia marginal asociada a la venta de los residuos forestales, pero hay un gasto asociado al transporte de los residuos. En cualquiera de los dos casos, el valor monetario que estima el propietario del establecimiento generalmente es en relación a una unidad de volumen que es el saco comercial; haciendo uso de los factores de conversión de la Tabla 27 y el resultado de la Ecuación 3.1 se calcula el valor monetario en función de la masa. En cada sector del área urbana y rural se manejan distintos valores de gasto o rédito, en el diagrama de barras que representa la Figura 42 se muestran los valores promedio de rédito o gasto por cada tipo de residuo de industria maderera detectado a través de las encuestas en el cantón.

Figura 42

Valores de gasto o rédito económico promedio de los residuos forestales de la industria maderera en el cantón Riobamba.



Aserrín



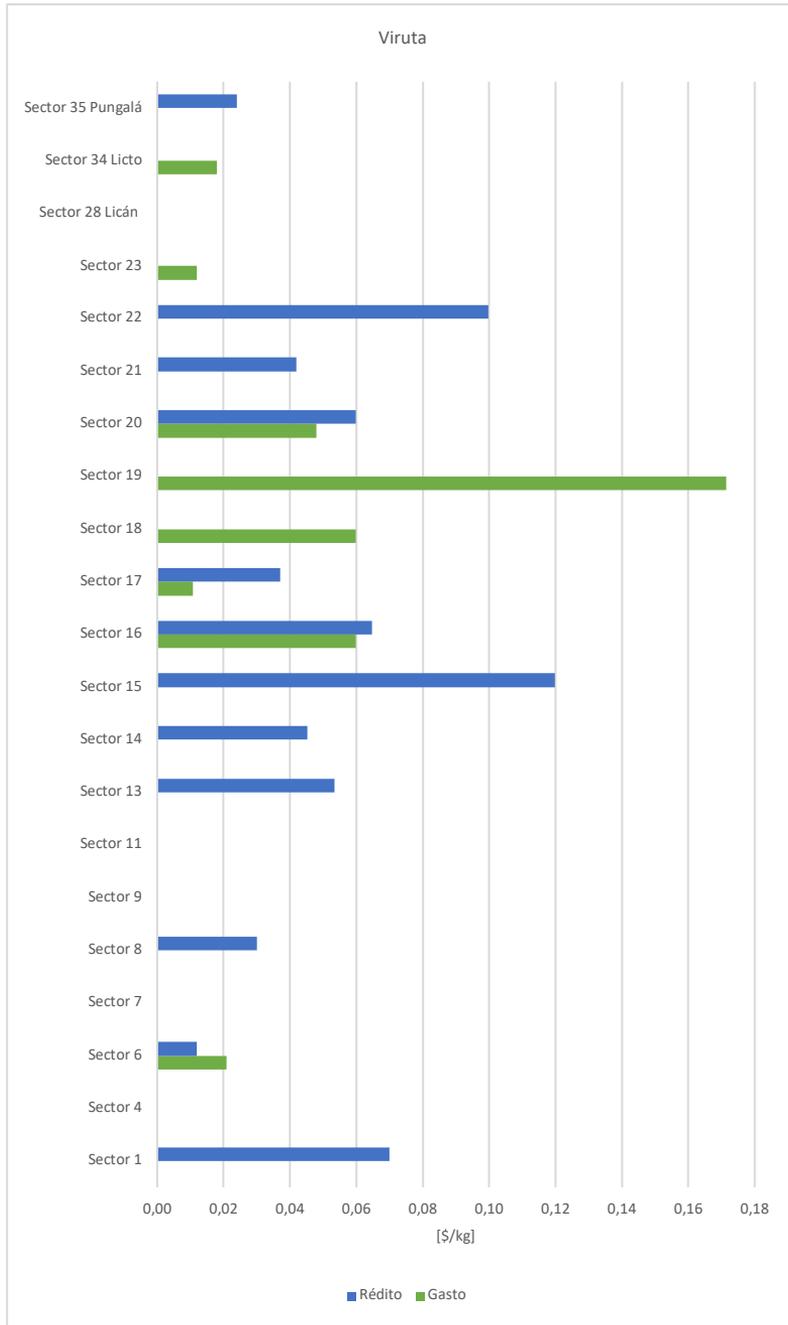
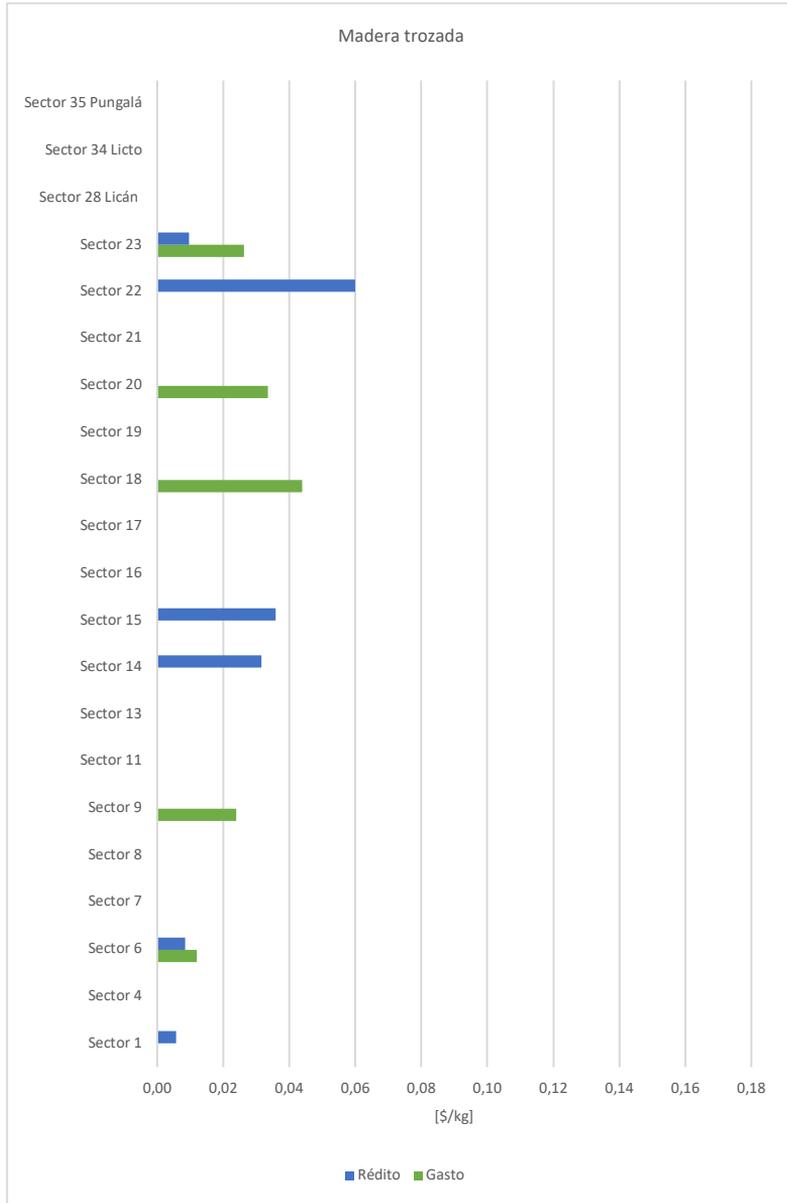
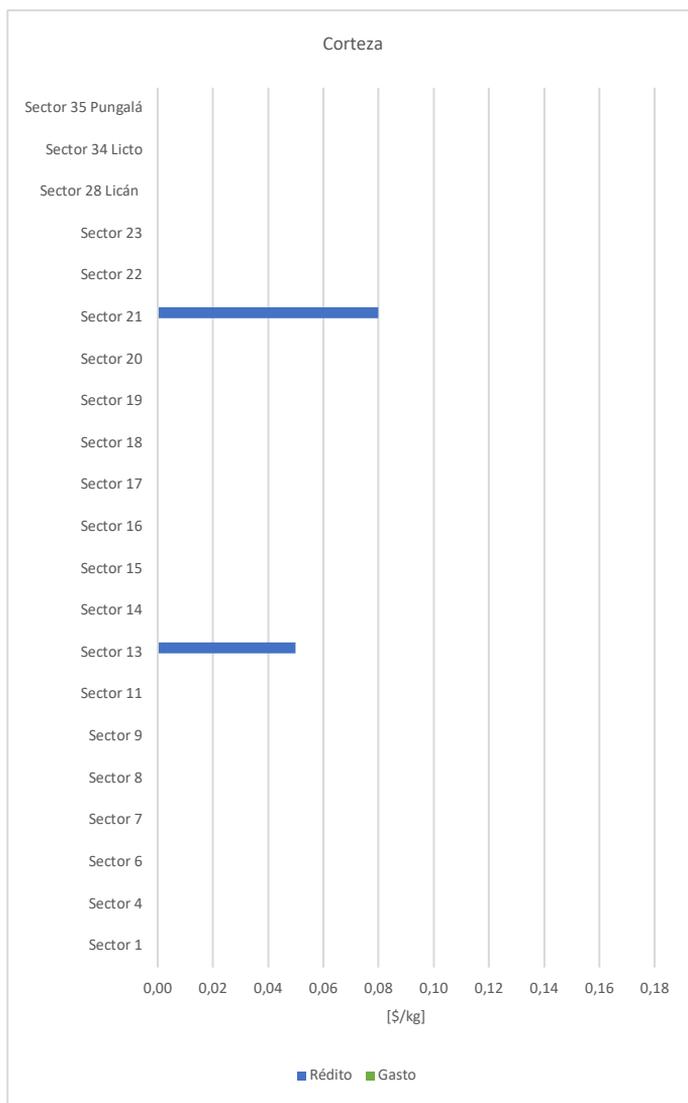


Figura 43

Valores de gasto o rédito económico promedio de los residuos forestales de industria maderera en cada sector [\$/kg].







En la Figura 43 se aprecia que en el cantón Riobamba el residuo forestal de industria maderera que mayor valor de rédito promedio representa es la viruta, con un valor de 5 ctvs/kg, pero si se trata de deshacerse del mismo el costo por esta actividad es el mismo.

De igual manera, el conjunto de diagramas de barras que representa, indica los valores promedio de gasto o rédito de cada uno de los desperdicios forestales por sector. La leña y la corteza tienen muy poca actividad económica según se muestra en las gráficas pero en el caso de la corteza es razonable considerarlo como un residuo de poca utilidad, por otro lado la leña aparece con esta característica no por su falta de uso sino porque muy pocos establecimientos la consideran como un desperdicio o residuo; en la mayoría de los casos es completamente útil este recurso y hasta se le tiene como un producto de venta dentro de los negocios. A través de los resultados anteriores, de manera general el costo promedio de venta de un kilogramo de residuo forestal de industria maderera (rédito) es de 0,033\$. El costo promedio del desalojo por transporte de un kilogramo de residuo forestal (gasto) es de 0,024\$.

$$\text{Rédito} = 0,033\$/kg \quad \text{Gasto} = 0,024\$/kg$$

Una vez que se ha conocido los valores de beneficio o gasto económico, por parte de los propietarios de los establecimientos encuestados, se puede estimar los totales máximos de ingresos o egresos por cada establecimiento y para una connotación más amplia por sectores. En estos valores el cálculo se basa tomando en cuenta la totalidad del volumen de residuos generados multiplicado por el valor de su venta o pago

por servicio de desalojo propio de cada establecimiento en un intervalo de tiempo de una semana, es decir que, para que los valores expuesto a continuación se cumplan, todos los residuos deben ser o completamente vendidos o completamente desechados en cada sector, lo cual efectivamente son los escenarios extremos en la dinámica económica del recurso biomásico del cantón. Los cálculos se indican en la Tabla 30 para cada uno de los residuos y en la Tabla 31 se presentan en función de los sectores.

Tabla 30

Valores máximos de gasto o rédito económico por tipo de residuo de industria maderera.

CLASE	GASTO [\$/semana]	RÉDITO [\$/semana]
Viruta	2,82	257,43
Aserrín	63,86	265,71
Corteza	0,00	10,43
Madera Trozada	8,64	43,43
Leña	0,00	12,63
Polvo	0,00	0,00
TOTAL	75,32	589,61

Tabla 31

Valores máximos de gasto o rédito económico por sector.

SECTOR	GASTO [\$/semana]	RÉDITO [\$/semana]
Sector 1		39,45
Sector 4		1,26
Sector 6	1,35	20,85
Sector 7	8	

SECTOR	GASTO [\$/semana]	RÉDITO [\$/semana]
Sector 8		3,05
Sector 9	7	
Sector 11	3	
Sector 13	1,26	131,75
Sector 14		82,5
Sector 15		4,38
Sector 16	4,5	27,10
Sector 17	20	92,6
Sector 18	10,49	0,75
Sector 19	7,51	
Sector 20	8,6	7,5
Sector 21		103,38
Sector 22		55,75
Sector 23	3,3	7,15
Sector 28 Licán		11,75
Sector 34 Licto	0,31	
Sector 35 Pungalá	0	0,4
TOTAL	75,32	589,61

Se puede observar que el aserrín es el residuo forestal de industria maderera que mayor gasto o redito puede generar y es coherente este resultado dado que es el residuo más abundante en el cantón. No obstante la viruta es el residuo de mayor valor o costo como se observa en la Figura 44

Figura 44

Porcentaje de participación de los residuos en el gasto y rédito económico.

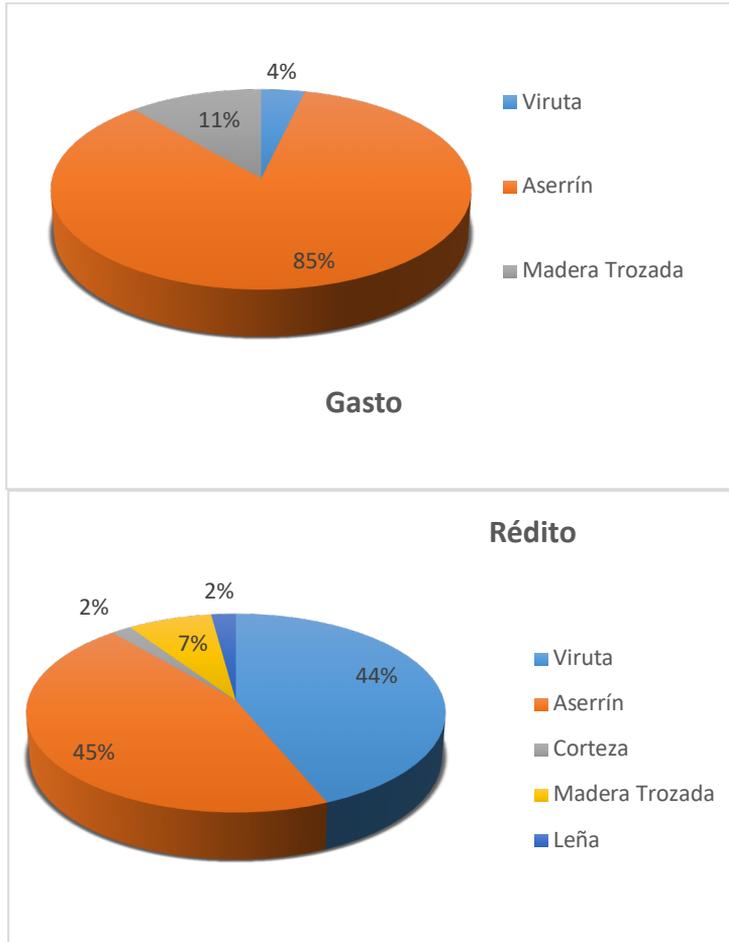
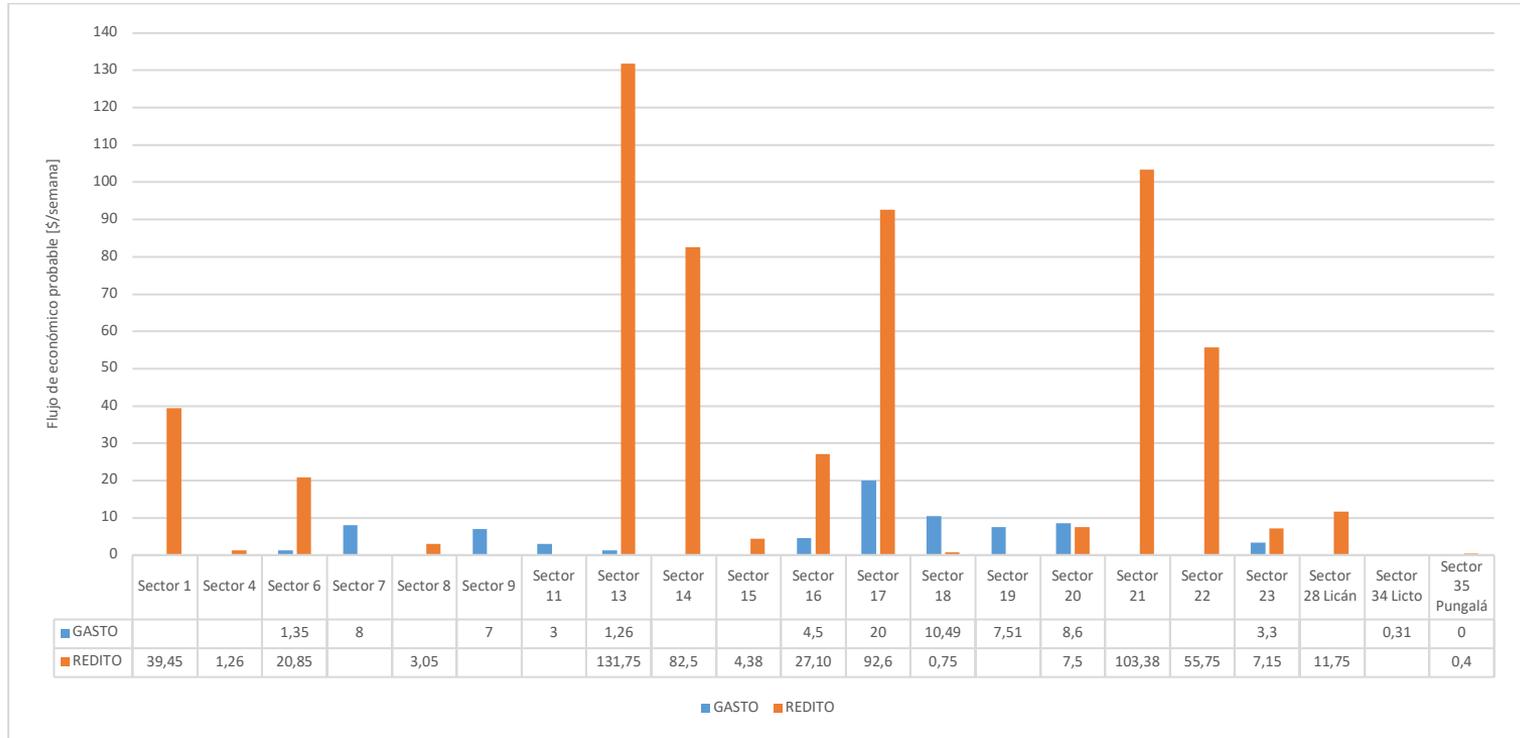


Figura 45

Valores máximos de gasto o rédito económico por cada sector [\$/semana].



Al ver la Figura 45 de manera general se puede obtener más rédito que gasto al activar económicamente a los residuos forestales de industria maderera, los sectores que más se beneficiarían son el 13, 21, 17, 14 y 22 anteriormente notamos pertenecen al grupo de sectores con mayor cantidad de generación de residuos.

3.1.6. Cantidad de residuos forestales disponibles para uso energético

La disponibilidad de los recursos es quizá el parámetro más importante para la valoración económica de un proyecto de aprovechamiento energético a partir de biomasa. Diversos estudios exponen el potencial que se tiene de varias fuentes renovables, pero las cifras entre lo potencial y lo aprovechable difieren, en algunos casos en gran cantidad, y esto es a causa de varios factores como la disponibilidad, factibilidad, tecnología existente, entre otros. En nuestro caso de estudio, el potencial existente en cualquier lugar donde se trabaje con recursos forestales y madera, desde bosques hasta talleres artesanales, es bastante apreciable teóricamente, muestra de ello veremos en Tabla 32, donde se expone la cantidad de residuos generados en el proceso de industrialización de la madera de una unidad de especie forestal aproximadamente el 75% es biomasa, pero como se ha expuesto con anterioridad no todo este valor podría ser destinado a fines energéticos de

gasificación, una cantidad resulta útil industrialmente como por ejemplo en la fabricación de aglomerados, otra se usa en combustión directa y un porcentaje se destina a varios usos como el abono, adecuación de animales y demás actividades. Otra importante cantidad de biomasa se queda en los mismos sitios de explotación de árboles y resulta inviable su extracción.

En el Ecuador, las proyecciones en torno al potencial biomásico forestal se encuentran calculadas en base a valores teóricos de generación de residuos y no representan una cantidad de energía aprovechable a corto y mediano plazo. Para que dicho potencial se convierta en una cantidad atractiva de deberían analizar varios ejes sociales, económicos y político-ambientales con propuestas de cambios a la realidad actual. La realidad es que los recursos biomásicos disponibles inmediatos para uso energético a través de gasificación son aquellos que los mismos agentes generadores, es decir los propietarios de los establecimientos estén dispuestos a donar. Esta cantidad de biomasa evidentemente no altera ninguna dinámica socioeconómica puesto que resultaría ser con certeza aquella que es destinada a desecho y quema, fines no útiles.

En el cantón Riobamba, la cantidad de residuos forestales de industria maderera que están disponibles para su acopio a través del consenso de donación de los establecimientos hacia la ESPOCH con fines investigativos son

los que se presentan en las siguientes Tabla 32 y Figura 46, para presentar el valor de sus masas en toneladas, el proceso es el mismo que se siguió antes usando los factores de conversión de la Tabla 27 y el resultado de la Ecuación 3.1.

Tabla 32

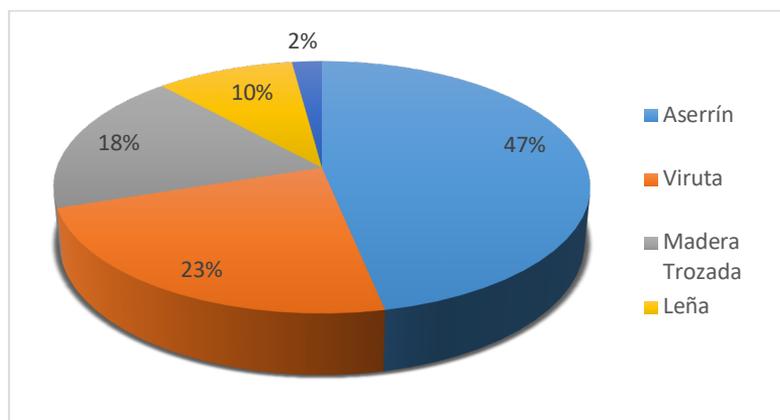
Masa de residuos forestales de industria maderera disponibles en el cantón Riobamba por sectores.

t/semana	TIPOS DE RESIDUOS					
SECTOR	Aserrín	Viruta	Madera Trozada	Leña	Corteza	Total
Sector 13	0,771	1,210	0,010	0,000	0,025	2,017
Sector 16	0,406	0,148	0,000	0,630	0,000	1,184
Sector 23	0,547	0,054	0,146	0,319	0,000	1,067
Sector 18	0,558	0,021	0,376	0,000	0,000	0,954
Sector 8	0,647	0,292	0,000	0,000	0,000	0,939
Sector 14	0,289	0,275	0,292	0,000	0,000	0,857
Sector 4	0,303	0,092	0,000	0,319	0,000	0,714
Sector 21	0,348	0,002	0,063	0,004	0,250	0,667
Sector 15	0,303	0,050	0,303	0,000	0,000	0,656
Sector 6	0,179	0,100	0,376	0,000	0,000	0,655
Sector 20	0,300	0,093	0,125	0,000	0,000	0,519
Sector 9	0,234	0,025	0,146	0,000	0,000	0,405
Sector 5	0,083	0,311	0,000	0,000	0,000	0,394
Sector 12	0,124	0,000	0,250	0,000	0,000	0,374
Sector 7	0,344	0,000	0,021	0,000	0,000	0,365
Sector 22	0,028	0,008	0,298	0,000	0,000	0,334
Sector 17	0,165	0,167	0,000	0,000	0,000	0,332
Sector 19	0,096	0,019	0,000	0,000	0,000	0,115
Sector 28 Licán	0,110	0,000	0,000	0,000	0,000	0,110
Sector 24	0,096	0,000	0,000	0,000	0,000	0,096
Sector 1	0,041	0,050	0,000	0,000	0,000	0,091
Sector 11	0,086	0,000	0,000	0,000	0,000	0,086
Sector 27 Cacha	0,000	0,083	0,000	0,000	0,000	0,083

t/semana	TIPOS DE RESIDUOS					
SECTOR	Aserrín	Viruta	Madera Trozada	Leña	Corteza	Total
Sector 34 Licto	0,031	0,015	0,000	0,000	0,000	0,046
Sector 25 Calpi	0,021	0,010	0,000	0,000	0,000	0,031
Sector 2	0,000	0,019	0,000	0,000	0,000	0,019
Sector 10	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017
Sector 26 San Juan	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017
Sector 35 Pungalá	0,007	0,004	0,000	0,000	0,000	0,011
Sector 3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sector 29 Cubijíes	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sector 30 Quimiag	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sector 31 San Luis	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sector 32 Punín	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sector 33 Flores	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	6,153	3,050	2,406	1,272	0,275	13,157

Figura 46

Residuos Forestales de industria maderera BIOMASA disponible para fines energéticos en el cantón Riobamba.



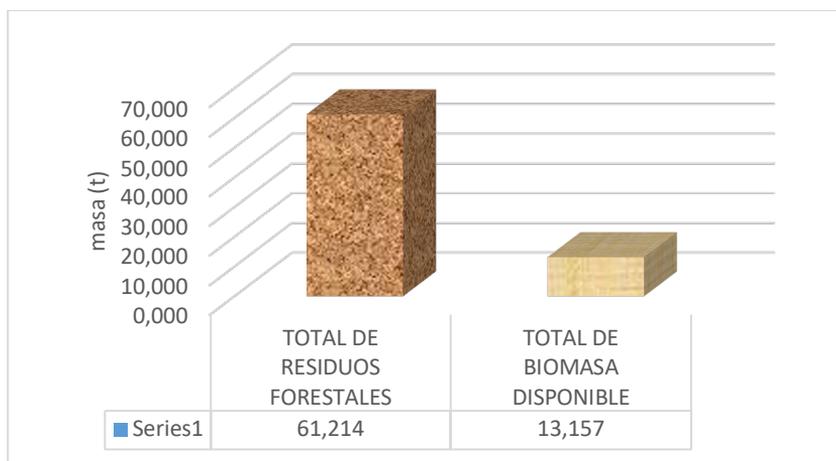
Se puede observar que los residuos forestales de industria maderera disponibles de mayor abundancia son el aserrín, la

viruta y la madera trozada representando casi el 90% de los recursos disponibles de manera inmediata.

Po otra parte, en la Tabla 32 se puede observar que de las 61,2 toneladas de residuos forestales de industria maderera generados en el cantón Riobamba en una semana, 13,16 toneladas están disponibles como donación para su acopio y uso con fines de generación energética, esto significa que de la totalidad de residuos forestales el 21,5% está disponible de manera inmediata y sin costo alguno, véase la representación gráfica en la Figura 47.

Figura 47

Total de residuos forestales de industria maderera vs total de biomasa disponible como donación en el cantón Riobamba.



La Figura 48 presenta comparativamente en barras la cantidad de residuos generados y la cantidad de residuos

disponibles en cada sector, no siempre los establecimientos que más generan son los mayores donantes, caso particular del sector 21. Los sectores que más cantidad de residuos generan coincidentemente son los que mayor recurso biomásico disponible tienen.

Figura 48

Residuos forestales de industria maderera: residuos generados vs residuos disponible como donación por sectores.

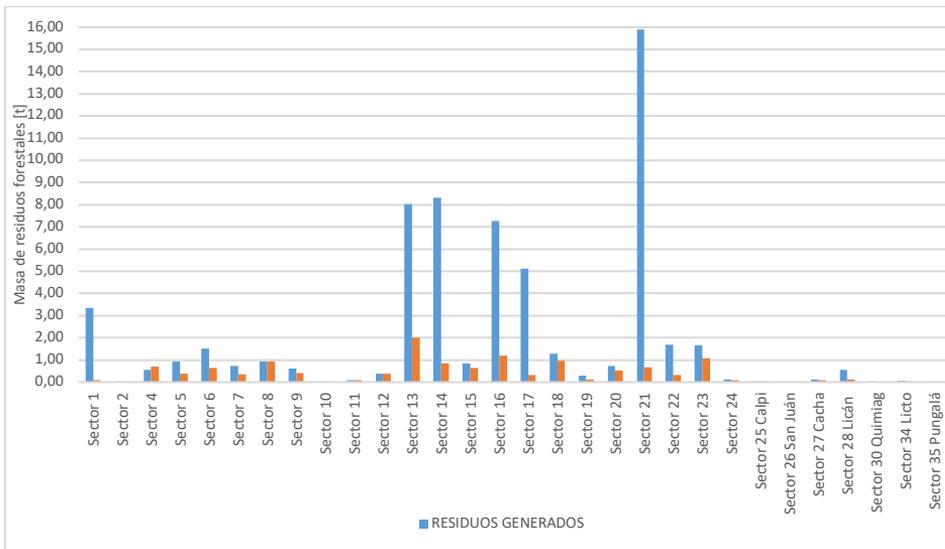
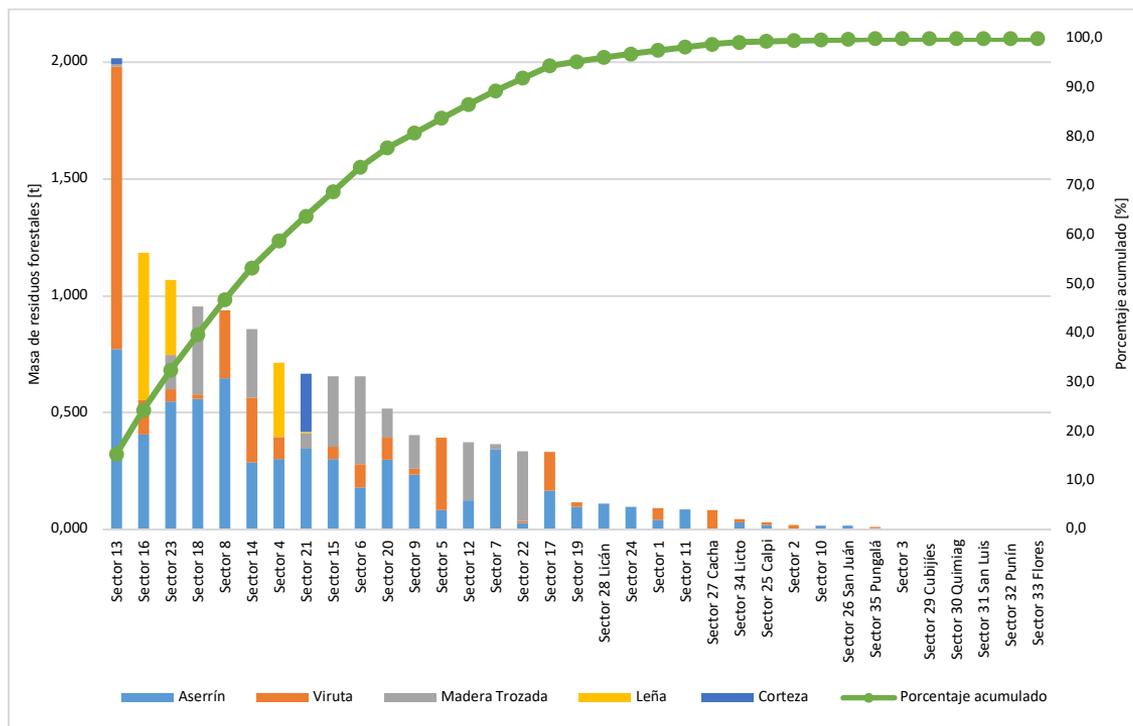
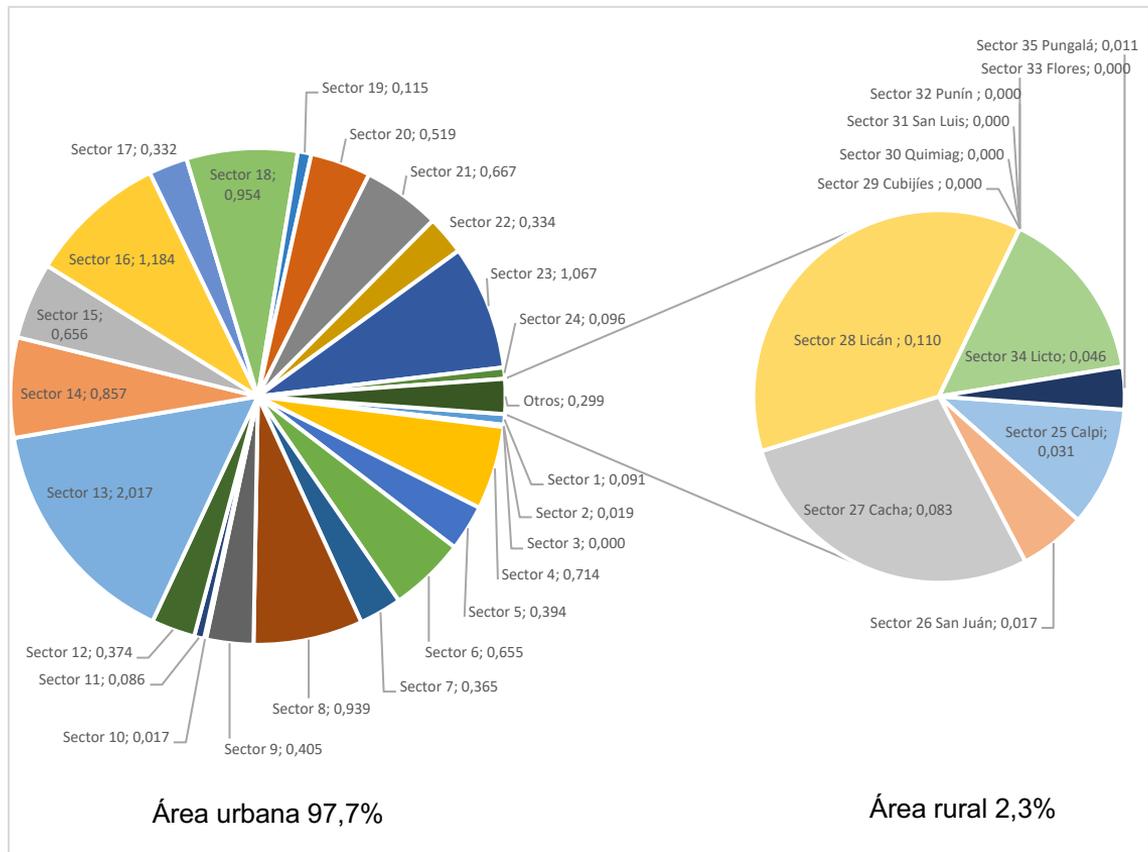


Figura 49

Masa de residuos forestales de industria maderera disponibles en el cantón Riobamba por sectores [t/semana].





La Figura 49 primero muestra en el diagrama de Pareto que los sectores de mayor incidencia en residuos forestales disponibles son 13, 16, 23, 18, 8, 14, 4, 21, 15, 6, 20, y 9; los doce sectores en conjunto representan el 80,8%. Luego en la segunda parte de la gráfica se puede notar que el sector rural tiene una incidencia muy baja en biomasa forestal disponible con solo el 2,3% de la cantidad total que es 13,16t. En detalle la cantidad de biomasa que poseen los sectores de mayor incidencia se presenta en la Tabla 33 a continuación.

Tabla 33

Sectores representativos de la disponibilidad de biomasa forestal residual de industria maderera en el cantón Riobamba.

SECTOR	TOTAL [t]	PORCENTAJE ACUMULADO [%]
Sector 13	2,017	15,3
Sector 16	1,184	24,3
Sector 23	1,067	32,4
Sector 18	0,954	39,7
Sector 8	0,939	46,8
Sector 14	0,857	53,3
Sector 4	0,714	58,8
Sector 21	0,667	63,8
Sector 15	0,656	68,8
Sector 6	0,655	73,8
Sector 20	0,519	77,7
Sector 9	0,405	80,8
TOTAL	10,634	

3.1.7. Cálculo de energía aprovechable desde la biomasa residual

En este acápite calcula la cantidad de energía que se puede obtener de la biomasa forestal residual de la industria maderera cuantificada. La primera forma de obtención de energía de estos tipos de combustibles es la combustión y la propiedad que se asocia es el poder calorífico, a través de este parámetro se puede estimar el primer dato energético de los recursos estudiados. El segundo dato energético y que es de mayor interés para el caso de estudio de este libro, es la cantidad de energía aprovechable a través de la gasificación downdraft. Los valores característicos de dicho gas se encuentran a través de un análisis cromatográfico y los parámetros de funcionamiento del gasificador se los determinaron a través de una medición in situ directa en las pruebas realizadas.

El poder calorífico en el caso de los recursos forestales se encuentra afectado por el contenido de humedad y en una medida más pequeña por la especie cultivada. El valor de la humedad de los residuos forestales depende en gran medida de la fase del proceso en que se extraiga y del secado de la materia prima antes de esa fase; dicho de otro modo la humedad depende del tipo de residuo. Para los tipos de residuos forestales de la industria maderera encontrados en el

estudio se presenta a continuación la estimación teórica de sus humedades en función de la Tabla 13, y el valor de su poder calorífico en función de su humedad en base al Anexo 4. El polvo de viruta no se enlista debido a que no representa un residuo disponible y adicionalmente su cantidad es la más pequeña de todos los residuos.

En la Tabla 34, se indica que en el cantón Riobamba tiene un total de energía disponible de 48,79 MWh/semana (175,54GJ/semana) si es que la biomasa va a ser utilizada para combustión directamente. Este dato se encuentra contemplado en su totalidad los tipos de residuos generados tanto en el sector urbano como en el sector rural.

Tabla 34

Energía disponible en base al poder calorífico de los residuos forestales de industria maderera del cantón Riobamba en una semana.

TIPO DE RESIDUO	U [%]	PC [MWh/t]	PC [GJ/t]	MASA [t]	ENERGÍA [MWh/semana]	ENERGÍA [GJ/semana]
Aserrín	33	3,22	11,59	6,153	19,81	71,32
Viruta	15	4,27	15,36	3,050	13,02	46,85
Madera Trozada	15	4,27	15,36	2,406	10,27	36,95
Leña	20	3,98	14,31	1,272	5,06	18,21
Corteza	50	2,23	8,03	0,275	0,61	2,21
			TOTAL	13,157	48,79	175,54

Nota: U: Humedad, PC: Poder calorífico.

Como se vió en la Tabla 34, existe un grupo de sectores con incidencia mayoritaria que representan el 80,8% de los recursos disponibles. Es conveniente hacer esta selección ya que el recurso se debe extraer de los lugares donde mayor acumulación se tenga. De esta manera la energía disponible de la biomasa residual forestal de la industria maderera en base al poder calorífico (PC) de los sectores representativos se indica en la Tabla 35. Ninguno de los sectores rurales es una potencial fuente de biomasa disponible debido a la pequeña cantidad que representan. A partir del valor total mostrado en la mencionada tabla se realizarán los cálculos posteriores.

Cuando se trata de cantidades de energía es siempre recomendable hacer una comparación con valores de energéticos de uso común para identificar de mejor manera las cifras que se están tratando, dicho de otra manera, se podría realizar la conversión de las cantidades de energía anteriormente señaladas de biomasa a unidades de energía representadas en combustibles de uso común como son el diésel la gasolina y el gas licuado de petróleo o GLP. En el Ecuador, los valores de poder calorífico de los combustibles mencionados se representan en la Tabla 36.

Tabla 35

Energía disponible en base al PC de la biomasa residual forestal de la industria maderera de los sectores representativos del cantón Riobamba en una semana.

TIPO DE RESIDUO	U [%]	PC [MWh/t]	PC [GJ/t]	MASA [t]	ENERGÍA [MWh/semana]	ENERGÍA [GJ/semana]
Aserrín	33	3,22	11,59	4,885	15,73	56,62
Viruta	15	4,27	15,36	2,362	10,09	36,28
Madera Trozada	15	4,27	15,36	1,837	7,84	28,22
Leña	20	3,98	14,31	1,272	5,06	18,20
Corteza	50	2,23	8,03	0,275	0,61	2,21
			TOTAL	10,631	39,34	141,62

Nota: U: Humedad, PC: Poder calorífico.

Por lo tanto la masa total disponible M_T y la cantidad de energía disponible E_{Disp} en base al PC son:

$$M_T = 10,631 t$$

$$E_{Disp} = 39,34 MWh/semana$$

Tabla 36

Valor del poder calorífico de combustibles en Ecuador.

COMBUSTIBLE	PODER CALORÍFICO NETO
DIESEL	10,700 [kWh/l]
GASOLINA	9,553 [kWh/l]
GLP	12,970 [kWh/kg]

Nota. Adaptado de Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016

En la Tabla 37 se muestran los resultados obtenidos de las cantidades equivalentes de diésel, gasolina y GLP que representa la energía disponible E_{Disp} en base a la PC de la biomasa residual forestal. También se indica el valor económico a la actualidad de estas cantidades de combustibles con subsidio y sin subsidio (precio de venta internacional). El valor indicado para la bombona de GLP es el correspondiente para el uso doméstico, ya que en nuestro país existe una tarifa diferenciada para el sector industrial o comercial.

En la Figura 50 se presenta de manera didáctica los resultados de la Tabla 37, donde se puede observar qué cantidad de combustibles fósiles representa la energía de biomasa disponible, además el valor económico que representa la utilización de estos recursos fósiles. Se hace la salvedad que valores están estimados en intervalo de tiempo de una semana.

Tabla 37

Equivalencia de energía disponible y representación económica del diésel, gasolina y GLP en una semana.

COMBUSTIBLE	EQUIVALENCIA DE ENERGÍA DISPONIBLE E_D	COSTO ECUADOR (Julio 2017)	REPRESENTACIÓN ECONÓMICA [\$] CON SUBSIDIO	COSTO INTERNACIONAL (julio 2017)	REPRESENTACIÓN ECONÓMICA [\$] SIN SUBSIDIO
DIESEL	956,11 gal	1,02 \$/gal	975,23	3,37 \$/gal	3222,09
GASOLINA	1070,91 gal	1,48 \$/gal	1584,94	3,83 \$/gal	4101,58
GLP	199,03 bombonas	1,6 \$/bombona	318,45	0,56 \$/l	3023,30

Nota: Bombona=15kg de GLP. Densidad de GLP a 15,5°C mezcla de butano 40% y propano 60%=553kg/m³.

Fuente: (Densidad GLP (Instituto ecuatoriano de normalización INEN, 2013). Costos combustibles: (Global Prices, 2017)

Figura 50

Representación de la energía disponible de biomasa forestal de la industria maderera del cantón Riobamba en función de combustibles de petróleo en una semana.



La energía disponible de biomasa forestal y su equivalencia en combustibles fósiles necesita ser transformada para su aprovechamiento como tal. El común denominador de los energéticos expuestos es la generación de energía térmica, por lo que la tecnología de combustión para cada uno de ellos tiene sus características particulares como es la eficiencia. La energía útil en los correspondientes procesos de combustión es distinta dependiendo del combustible y su tecnología usada.

Como se mencionó al inicio de este capítulo de cuantificación energética, el segundo resultado al que se pretende llegar es a la cantidad de energía disponible a través del proceso de gasificación downdraft. La experimentación es muy importante para obtener los datos de funcionamiento como caudales máxicos de agente gasificante (aire) y gas pobre producido.

Para el arranque del gasificador se requiere la combustión de biomasa forestal, los resultados obtenidos indican que la materia prima más abundante en el sector maderero es el eucalipto, por tanto, considerando la información de la composición química de esta especie (Tabla 18), se calcula la masa de aire teórico o estequiométrico requerida para su combustión a través de la Ecuación 2.1.

$$m_{at} = 5,90 \text{ kg/kg}$$

La masa de aire real para asegurar una combustión completa en el arranque tomado un coeficiente de exceso de aire de 1,5 según la Tabla 19, y la Ecuación 2.2, es:

$$m_{ar} = 8,85 \text{ kg/kg}$$

Considerando en la Ecuación 2.4, una temperatura de 20°C normalizada para el aire y un consumo de combustible de 15kg/h, se encuentra el flujo volumétrico de aire para combustión:

$$\dot{V}_{a \text{ arranque}} = 0,0426 \frac{m^3}{s} = 153,29 \frac{m^3}{h}$$

La masa de aire requerida para gasificación usando la composición de la madera (Tabla 18), y una relación de equivalencia de 0,25 según lo recomendado (Basu, 2010), se calcula con la Ecuación 2.3:

$$m_{ag} = 1,475 \text{ kg/kg}$$

Considerando nuevamente la Ecuación 2.4, una temperatura de 48°C para el aire y un consumo de biomasa de 40kg/h, se encuentra el flujo volumétrico de aire requerido para gasificación:

$$\dot{V}_{a \text{ gasificación}} = 0,0207 \frac{m^3}{s} = 74,639 \frac{m^3}{h}$$

La cantidad de biomasa utilizada para el arranque y para el proceso de gasificación como tal es registrada en la Tabla 38. Es importante el control de los caudales máxicos de combustible y aire en la etapa de arranque así como su tiempo de combustión, para que su estadía en el hogar del gasificador sea específicamente para el calentamiento del equipo, una vez concluida esta fase se agregará la biomasa a gasificar y a partir de este momento el aire se reduce al flujo volumétrico $\dot{V}_{a \text{ gasificación}}$, en cuyo caso se estará promoviendo las reacciones con deficiencia de aire. Cada acción quedará registrada con un cronometraje que inicia en cero al comenzar la etapa de arranque.

Tabla 38

Proceso de arranque y puesta en marcha.

ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO [HH:MM]	IMAGEN
Inspección del equipo de gasificación.	-	0:00	
Biomasa: Madera trozada de eucalipto, dimensiones aproximadas de 3cmx2cmx10cm.	40 kg/h de madera trozada para gasificación.	0:00	

ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO [HH:MM]	IMAGEN
Registro de peso de biomasa leña y madera trozada.	<p>15 kg de madera trozada o leña para arranque.</p> <p>40 kg de madera trozada para gasificación.</p>	0:00	
Arranque del gasificador con combustión de leña y madera trozada.	15 kg	0:00	

ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO [HH:MM]	IMAGEN
Control de flujo volumétrico de aire para combustión completa \dot{V}_a arranque $T_5 = 20^\circ\text{C} = 293\text{K}$ $P_{atm} = 72875\text{Pa}$ PI-20	$153,29 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ Válvula abierta al 100% $\Delta P_{caudalímetro} = 5,4\text{cmH}_2\text{O}$	0:05	
Calentamiento del equipo de gasificación.	-	0:30	
Dosificación de biomasa madera trozada para gasificación.	40 kg/h	1:00	

ACTIVIDAD	CANTIDAD	TIEMPO [HH:MM]	IMAGEN
Control de flujo volumétrico de aire para gasificación $\dot{V}_{a \text{ gasificación}}$ $T_6 = 48^\circ\text{C} = 321\text{K}$ $P_{atm} = 72875\text{Pa}$ PI-20	$74,639 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 59,09 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ $\Delta P_{\text{caudalímetro}} = 1,4\text{cm}$	1:01	
Producción de gas pobre.		1:05	
Registro de flujo volumétrico de gas pobre $\dot{V}_g \text{ producido}$ $T_3 = 70^\circ\text{C} = 343\text{K}$ $P_{atm} = 72875\text{Pa}$ PI-10	$129,93 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 88,88 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ $\Delta P_{\text{caudalímetro}} = 10,5\text{cm}$	1:16	

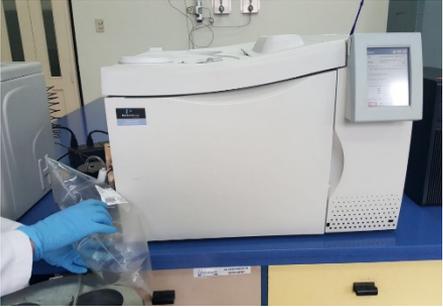
Como se puede observar en la Tabla 39, una vez alcanzada la producción de gas pobre este se lo puede combustionar inmediatamente en la chimenea de salida lo cual demuestra que se está consiguiendo un gas combustible con este proceso de gasificación. En esta fase se debe controlar la condición constante del funcionamiento del gasificador con el objetivo de tomar la muestra del gas para su análisis en el laboratorio.

Tabla 39

Registro de datos y toma de muestra de gas pobre.

ACTIVIDAD	DETALLE	TIEMPO [HH:MM]	IMAGEN
Registro de temperaturas de agente gasificante y gas pobre T3,T5 y T6.	Cada 15 min	Desde 1:00 hasta 2:00	
Registro de flujo volumétrico del gas pobre producido. PI-10	Cada 15 min	Desde 1:00 hasta 2:00	
Registro de flujo volumétrico del aire que ingresa al gasificador. PI-20	Cada 15 min	Desde 1:00 hasta 2:00	

ACTIVIDAD	DETALLE	TIEMPO [HH:MM]	IMAGEN
Toma de muestra de gas pobre	Se recogen dos muestras para el laboratorio		
Almacenamiento y transporte de muestra de gas pobre	El transporte se lo realiza en un cooler para prevenir su contaminación		

ACTIVIDAD	DETALLE	TIEMPO [HH:MM]	IMAGEN
<p>Análisis cromatográfico del gas pobre Departamento de Ingeniería Química, Laboratorio de análisis instrumental EPN. Ver resultados en Tabla 41</p>	<p>Cromatógrafo de gases modelo: Perkin Elmer Clarus 500</p>		

En la Tabla 40 se presentan los registros de los parámetros de gasificación como la presión diferencial que sirve para calcular el flujo volumétrico y los valores correspondientes de densidad del gas y del aire, Anexos 5 y 8 correspondientemente.

Tabla 40

Registro de parámetros gasificación.

HOR A	PI-10 [cmH20]	\dot{V}_g produci [m ³ /h]	\dot{m}_g produci [kg/h]	PI-20 [cmH20]	\dot{V}_a gasificaci [m ³ /h]	\dot{m}_a gasificaci [kg/h]
1:00	10,6	130,27	88,03	1,5	79,12	62,59
1:15	10,5	129,94	88,88	1,5	79,12	62,59
1:30	10,5	129,94	88,88	1,5	79,12	62,59
1:45	10,4	129,58	87,57	1,5	79,12	62,59
2:00	10,5	129,94	88,88	1,5	79,12	62,59

Los resultados del análisis cromatográfico se encuentran en la Tabla 41, el respaldo de la originalidad de estos valores se lo puede apreciar en el Anexo 9.

Tabla 41*Resultados de análisis cromatográfico en laboratorio EPN.*

ANALISIS LAI-17-039		
NORMA ASTM 1945-03 (2010)		
COMPONENTES	% PESO	% MOLES
Hidrógeno	1,98	26,28
Oxígeno	0,33	0,28
Nitrógeno	17,16	16,38
CO	7,4	7,06
Metano	4,56	7,6
CO2	66,99	40,7
Etano	1,11	0,99
Agua	0,48	0,71
	Total	100
DENSIDAD RELATIVA	0,93	
DENSIDAD	1,10	kg/Nm ³
Poder calorífico superior a 25°C	2864,95	Btu/lb
	6,681	MJ/kg
Poder calorífico inferior a 25°C	2229,13	Btu/lb
	5,198	MJ/kg

Nota: Condiciones normales del aire, 1 atmosfera y 25°C. $\rho=1,184 \text{ kg/m}^3$

Fuente: (Análisis cromatográfico de gas pobre, Laboratorio de análisis instrumental EPN, Anexo 9)

Con los datos obtenidos anteriormente se realizan los cálculos para el balance de masa representado en la Figura 32 y la Ecuación 2.6. Para una mejor exposición en la Tabla 42 se encuentran los valores de este balance.

Tabla 42*Balance de masas en el proceso de gasificación.*

Temperatura de aire, agente gasificante	48	°C
Densidad de aire	0,791	kg/m ³
Temperatura gas	70	°C
R Constante particular del gas, experimental	0,3106	kJ/kg K
Densidad de gas	0,684	kg/m ³
Presión atmosférica Riobamba	72,875	kPa
ENTRADAS		
Flujo másico de biomasa forestal	40	kg/h
Flujo másico de aire agente gasificante	62,59	kg/h
Total	102,59	kg/h
SALIDAS [kg/h]		
Flujo másico del gas pobre	88,88	kg/h
Flujo másico de condensables	0,28	kg/h
Flujo másico cenizas	3,7	kg/h
Total	92,86	kg/h

Los cálculos adicionales, se presentan en la Tabla 43 que exponen índices de funcionamiento propios del gasificador, los mismos que sirven para comparaciones con otros estudios. Dichos índices están en función de un valor de masa que corresponde a la biomasa forestal residual de la industria maderera, por ejemplo: La razón de producción de gas 2,22 kg/kg, lo que quiere decir es que se ha producido 2,22 kilogramos de gas pobre por cada kilogramo de biomasa forestal; no se debe mal interpretar este resultado como si se estuviera creando materia, se recuerda que el gas tiene una densidad mucho menor a la de la biomasa y además también

es el resultado de una reacción con otro elemento que es el aire.

Tabla 43

Valores e Índices másicos de gasificación.

Porcentaje de recuperación de masa	90,52	%
Razón de producción de gas	2,22	kg/kg
Razón de producción de gas	2,029	Nm ³ /kg
Razón de producción de condensados	0,007	kg/kg
Razón de producción de cenizas	0,093	kg/kg
Razón de ingreso de aire	1,565	kg/kg
Aire teórico	5,90	kg/kg
Razón de equivalencia ER experimental	0,265	

Nota: condiciones normales del aire, 1 atmosfera y 25°C.

Los cálculos para el balance de energía se los representa en la Tabla 44, atendiendo a lo expuesto en la Figura 33 y la ecuación 2.7. Siguiendo el mismo esquema del balance anterior se calculan varios índices importantes los cuales se exponen en la Tabla 45. Como aclaración para esta última tabla, la razón de producción de energía también está en función de la masa de biomasa residual de la industria maderera (11,55 MJ/kg).

Tabla 44*Balance de energías en el proceso de gasificación.*

ENTRADAS	[MJ/h]	[KW]
$\dot{m}_{biomasa} PCI_{biomasa}$	614,40	170,667
$\dot{m}_{aire} h_{aire}$	20,047	5,569
Total	634,45	176,235

SALIDAS	[MJ/h]	[KW]
$\dot{m}_{gas} PCI_{gas}$	462,028	128,3410
$\dot{m}_{gas} h_{gas}$	136,328	37,8688
$\dot{m}_{cenizas} C p_{cenizas} (T_{cenizas} - T_{amb})$	2,238	0,6216
$\dot{Q}_{perdido}$	25,261	7,0170
Total	625,85	173,848

Tabla 45*Índices energéticos en gasificación.*

Porcentaje de calor perdido	3,98	%
Energía producida	166,21	kW
Potencia térmica	128,34	kW
Razón de producción de energía	11,55	MJ/kg

Los valores de eficiencia del proceso de gasificación se los obtiene a partir de las ecuaciones 2.12 y 2.13, eficiencia en frío η_F y eficiencia en caliente η_C correspondientemente. Estos valores son analizados de manera comparativa en la sección de Discusión.

$$\eta_F = \frac{\dot{m}_{gas} PCI_{gas}}{\dot{m}_{biomasa} PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire} h_{aire}} = 72,82\%$$

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_{gas}PCI_{gas} + \dot{m}_{gas}h_{gas}}{\dot{m}_{biomasa}PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire}h_{aire}} = 94,31\%$$

3.2. Conjeturas sobre el caso de estudio

En este apartado se realiza una comparación de los resultados obtenidos con estudios similares, un cálculo de costos de generación con los equipos actuales y se analiza la posibilidad de implementación de una planta piloto en función de la potencia disponible.

3.2.1. Comparación de valores de otros estudios similares

La etapa experimental del caso de estudio proporciona valores descriptivos del proceso de gasificación con el equipo actualmente instalado, en las Tablas 46 y 47 se muestran las comparaciones de varios parámetros con estudios en condiciones similares, biomasa forestal y gasificación downdraft. Las referencias bibliográficas de dichos estudios corresponden a las fuentes (Basu, 2010; Pratik & Babu, 2009; Zainal et al., 2002),

Tabla 46

Comparativa de análisis elemental de gas pobre obtenido por gasificación downdraft.

AUTORES	CO	CO2	H2	CH4	N2
Caso de estudio presente 2017	7,06	40,7	26,28	7,6	16,38
Zainal Z.A. 2002	24,04	14,66	14,05	2,02	43,62
Pratik N. 2009	22	6	14	1	57
Prabir Basu 2010	21	13	17	1	48

Tabla 47

Comparativa de parámetros de gas pobre obtenido por gasificación downdraft.

AUTORES	PC [MJ/m ³]	Eficiencia en frío η_c [%]	Razón de equivalencia	Tasa de producción de gas [Nm ³ /kg]	Densidad [kg/m ³]
Caso de estudio presente	5,718	72,82	0,265	2,029	1,1
Zainal Z.A.	5,62	80,91	0,388	1,08	1,1
Pratik N.	6,34	56,87	0,205	1,62	-
Prabir Basu	5,7	80	0,2 - 0,25	-	-

En la Tabla 46 los valores del análisis elemental del gas pobre producido tienen una discrepancia significativa en comparación con los tres estudios propuestos. En tanto que en la Tabla 47 donde se llega a valorar los poderes caloríficos se tiene un óptimo resultado, así como también por el caso de la eficiencia del equipo, la razón de equivalencia, tasa de producción de gas y densidad.

Con los valores obtenidos en las pruebas del gasificador, la cuestión que se plantea se encuadra en un análisis financiero con el equipo de gasificación actual de la utilidad de la biomasa forestal como energético en el cantón Riobamba y también la evaluación de la viabilidad en la implementación de una planta piloto para el aprovechamiento de la biomasa a través de los parámetros locales, cantidad de biomasa forestal residual de la industria maderera aprovechable energéticamente.

3.2.2. Análisis financiero gasificador actual

El análisis financiero del caso de estudio plantea dos escenarios, la utilización del gas pobre producido para fines térmicos o la utilización en generación eléctrica. De esta manera se obtiene los costos de generación para los dos casos propuestos y se evalúa frente a los costos actuales del gas licuado de petróleo en el primero y la energía eléctrica en el segundo. Para este desarrollo se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos que son determinantes en el uso de la biomasa para generación:

- Transporte de la biomasa residual forestal de industria maderera desde los sectores de la urbe.
- Acopio de la biomasa residual forestal de industria maderera en la planta de gasificación
- Operación de la planta de gasificación.

El transporte de la biomasa residual se lo realiza desde los sectores que se indican en la Tabla 33, estos son los más representativos en disponibilidad de biomasa forestal aprovechable en el cantón Riobamba. La Figura 51 y el uso de la aplicación Google Maps se estima la distancia que debe recorrer un camión de carga con capacidad de 10 toneladas hasta el lugar de procesamiento, ESPOCH. Esta figura adicionalmente indica con un código de colores la cantidad de residuos forestales aprovechables que tiene cada sector.

En el Ecuador el costo para la transportación de carga está sujeta a la libre oferta y demanda, según lo señala el Consejo Nacional de Tránsito y Transporte, sin embargo, el valor referencial para rutas menores a 400 km es de 0,68\$ el flete por kilómetro. Los costos horarios ocupacionales se los ha obtenido de la Contraloría General del Estado, en su actualización de salarios mínimos para el mes de enero 2017. Estos valores se detallan en la Tabla 48. En la Tabla 49 se presentan los cálculos de costos por transporte de los residuos forestales desde cada sector.

Tabla 48.

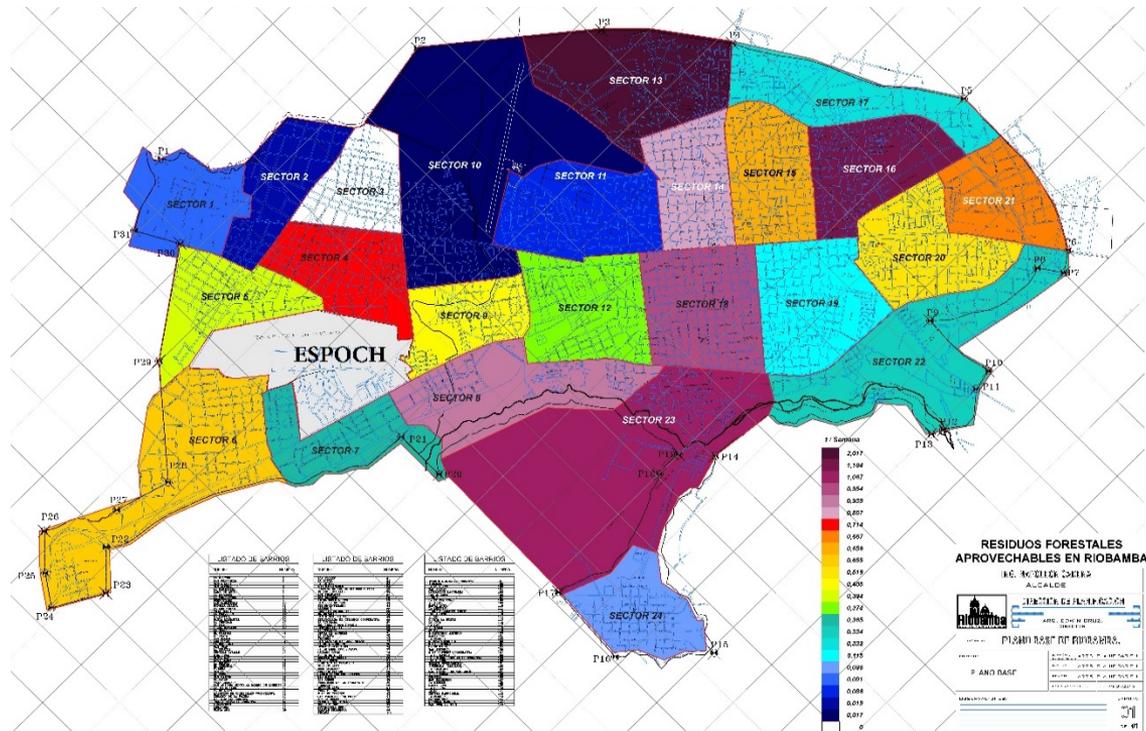
Valores de variables para el transporte de carga.

TRANSPORTE		
Costo transporte	0,68*	\$/km
Velocidad promedio del camión en la ciudad	20	Km/h
Tiempo de carga manual	1	h/t
Costo Ayudante	3,41**	\$/h
Costo chofer	5**	\$/h

Nota. Adaptado de (Agencia Nacional de Transito, 2017)*, (Contraloría General del Estado, 2017)**

Figura 51

Residuos forestales de la industria maderera aprovechables en Riobamba



El acopio de la biomasa o residuos forestales se la debe realizar en un lugar acondicionado con cubierta para evitar la absorción de humedad por lluvia y que esté libre de posibles contaminaciones.

La operación de la planta de gasificación actualmente implementada por su tamaño y cuidados, necesita de un operador que haya recibido una inducción completa en el proceso de gasificación y pueda controlar los parámetros de funcionamiento. El material de filtrado debe ser cambiado según los parámetros de diseño señalados anteriormente. El consumo eléctrico del ventilador es estimado con la tarifa actual de 0,0933\$/kWh (Agencia de Regulación y control de la electricidad ARCONEL, 2017). El primer análisis se lo realiza para el consumo de gas generado en uso térmico lo cual se detalla en las Tablas 51 y 52.

Tabla 50

Costo por transporte de residuos forestales.

SECTOR	TOTAL [t/semana]	DISTANCIA [km]	VALOR POR RECORRIDO [\$]	TIEMPO TOTAL (recorrido + carga) [h]	COSTO CHOFER [\$]	COSTO AYUDANTE [\$]	TOTAL [\$/semana]
Sector 13	2,017	5,51	3,75	2,29	11,5	7,82	23,03
Sector 16	1,184	6,31	4,29	1,50	7,50	5,11	16,90
Sector 23	1,067	3,27	2,22	1,23	6,15	4,20	12,57

SECTOR	TOTAL [t/semana]	DISTANCIA [km]	VALOR POR RECORRIDO [\$]	TIEMPO TOTAL (recorrido + carga) [h]	COSTO CHOFER [\$]	COSTO AYUDANTE [\$]	TOTAL [\$/semana]
Sector 18	0,954	3,6	2,45	1,13	5,67	3,87	11,98
Sector 8	0,939	1,69	1,15	1,02	5,12	3,49	9,76
Sector 14	0,857	4,51	3,07	1,08	5,41	3,69	12,17
Sector 4	0,714	1,97	1,34	0,81	4,06	2,77	8,17
Sector 21	0,667	7,01	4,77	1,02	5,09	3,47	13,32
Sector 15	0,656	5,33	3,62	0,92	4,61	3,15	11,38
Sector 6	0,655	3,24	2,20	0,82	4,09	2,79	9,07
Sector 20	0,519	6,17	4,20	0,83	4,14	2,82	11,15
Sector 9	0,405	1,51	1,03	0,48	2,40	1,64	5,07
	10,634						144,59

De estos resultados se obtiene por tanto que el costo de transporte por unidad de masa de los residuos forestales es:

$$\text{Costo Transporte} = 13,60 \frac{\$}{t} = 0,0136 \frac{\$}{kg}$$

Tabla 51

Valores de variables para la operación del gasificador para generación energía térmica.

OPERACIÓN TERMICO 40 h		
Tela de fibra de vidrio para filtro de mangas	5*	\$/m ²
Tiempo útil Tela de fibra de vidrio	16**	h
Tarifa eléctrica	0,0933	\$/kWh
Capacidad de procesamiento de biomasa	40	kg/h
Tiempo de trabajo de la planta	40	h/semana
Biomasa procesada	1600	Kg/semana

Nota: Costo comercial de la Tela de fibra de vidrio en Chimborazo*, Tiempo de acumulación de partículas en el filtro, pagina 40**

Tabla 52

Costo por operación de gasificador para generación energía térmica.

ITEM	CANT.	UNIDAD	COSTO [\$/h]	TIEMPO [h/semana]	TOTAL [\$/semana]
Operador	1	persona	3,45*	45	155,25
Tela de fibra de vidrio para filtros	1,94	m ²	0,61	40	24,25
Material para arranque del gasificador	40	kg/h	0,52	5	2,59
Mantenimiento					21
Consumo eléctrico Ventilador 1/2 Hp (0,933\$/kWh)	1	u	0,03	50	1,71
					204,80

De estos resultados se obtiene que el costo de operación del gasificador por unidad de masa de los residuos forestales de la industria maderera para generación de energía térmica es:

$$\text{Costo Operación} = 128,00 \frac{\$}{t} = 0,128 \frac{\$}{kg}$$

El costo de generación del gas pobre con los parámetros establecidos se indica en la Tabla 53.

Tabla 53

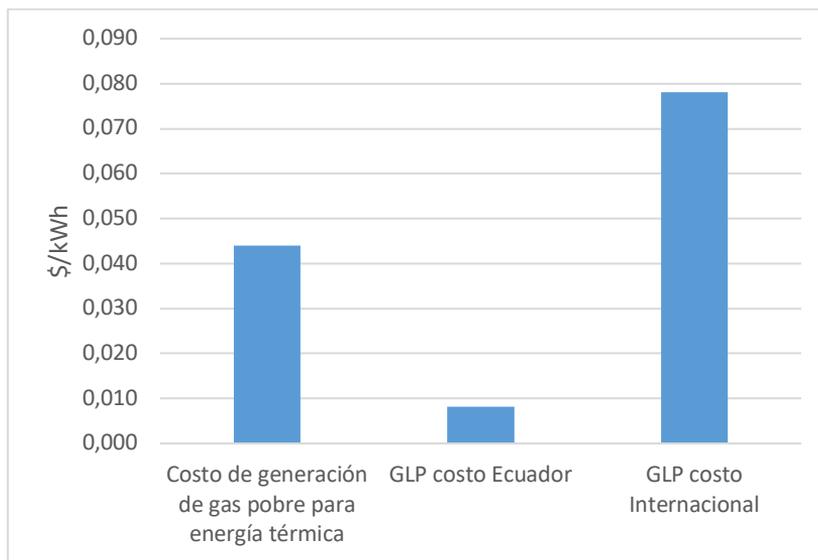
Valores para generación de energía térmica.

GENERACION TERMICA 40 h		
Costo de Transporte de biomasa	20,70	\$/semana
Costo de operación del gasificador	204,80	\$/semana
Potencia térmica del gasificador	128,34	kW
Costo de generación para energía térmica	0,044	\$/kWh
Costo uso GLP costo Ecuador	0,008	\$/kWh
Costo uso GLP costo Internacional	0,078	\$/kWh

Nota. Costo uso GLP costo Ecuador e Internacional (Global Prices, 2017)

Figura 52

Comparativa precios entre gas pobre y GLP para energía térmica.



Nota. Adaptado de Costos GLP (Global Prices, 2017)

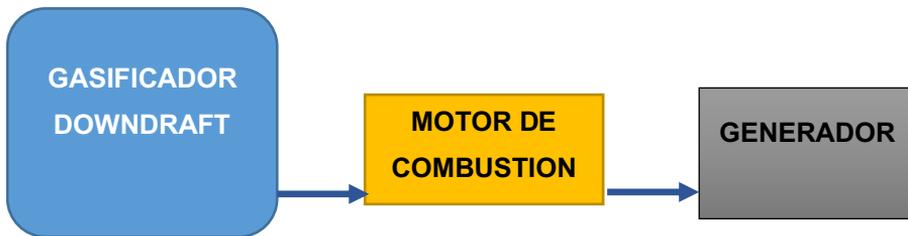
Como se puede apreciar en la Figura 52 el costo de generación de gas pobre con el gasificador actual, tomando en cuenta los parámetros citados anteriormente, es favorable al compararlo con el costo del GLP solo si este tendría un precio internacional, es decir sin subsidio.

El segundo análisis se lo realiza tomando en cuenta la generación de gas pobre para uso eléctrico, se requiere de un conjunto electrógeno que consta de un motor y un generador, véase el esquema de la Figura 53, en este apartado se evalúa los costos de generación por tanto el costo de implementación

del conjunto electrógeno será analizado más adelante, para tener la certeza de la Viabilidad en la implementación de una planta piloto.

Figura 53

Esquema de conjunto gasificador grupo electrógeno



La Tabla 54 indica los valores de las variables para la operación del gasificadores como consumibles, valores de los consumibles y eficiencias de equipos. La Tabla 55 indica el costo de operación de generación de energía eléctrica a través de la gasificación.

Tabla 54

Valores de variables para la operación del gasificador para generación eléctrica.

OPERACIÓN ELECTRICICO 40 h		
Tela de fibra de vidrio	5	\$/m ²
Tiempo útil tela de fibra de vidrio	16	h
Costo eléctrico	0,093	\$/kWh
Capacidad de procesamiento de biomasa	40	kg/h
Tiempo de trabajo de la planta	40	h/semana
Biomasa procesada	1600	kg/semana
Eficiencia Grupo electrógeno	30	%

Nota. Costo comercial de la Tela de fibra de vidrio en Chimborazo*, Tiempo de acumulación de partículas en el filtro, pagina 40**

Tabla 55

Costo por operación de gasificador para generación energía eléctrica.

ITEM	CANT.	UNIDAD	COSTO [\$/h]	TIEMPO [h/ semana]	TOTAL [\$/semana]
Operador	1	persona	3,45	45	155,25
Tela de fibra de vidrio para filtros	1,94	m ²	0,61	40	24,25
Material para arranque del gasificador	40	kg/h	0,52	5	2,59
Mantenimiento					35
Consumo eléctrico Ventilador 1/2 Hp (0,933\$/kWh)	1	u	0,03	50	1,71
					218,80

De los resultados anteriormente expuestos se obtiene que el costo de operación del gasificador por unidad de masa de los residuos forestales para generación de energía eléctrica es:

$$\text{Costo Operación} = 136,75 \frac{\$}{t} = 0,1368 \frac{\$}{kg}$$

El costo de generación del gas pobre con los parámetros establecidos se indica en la Tabla 56.

Tabla 56

Valores para generación de energía eléctrica.

GENERACION ELECTRICA 40 h		
Costo de Transporte de biomasa	20,70	\$/semana
Costo de operación del gasificador	218,80	\$/semana
Potencia térmica del gasificador	128,34	kW
Potencia eléctrica del gasificador	38,502	kW
Costo de generación	0,156	\$/kWh
Costo Energía eléctrica Ecuador	0,093*	\$/kWh

Nota. Adaptado de (Agencia de Regulación y control de la electricidad ARCONEL, 2017)*

Como se pudo observar, tanto para la generación de energía térmica como para la eléctrica se plantea un tiempo de operación semanal de la planta de 40 horas, lo que significaría 8 horas en 5 días en horarios matutino y/o vespertino; en el caso del uso térmico es un tiempo adecuado que podría ser invertido en el uso de cocción de alimentos y calentamiento de agua sanitaria. Pero para el uso eléctrico este tiempo podría ser extendido a un funcionamiento permanente llegando a las 120 horas semanales, lo que significaría 24 horas en 5 días; los usos podrían ser en la mañana y tarde para el abastecimiento de luz e implementos de oficina y en la noche podría destinarse exclusivamente a iluminación. Esta operación extendida genera

una pequeña disminución en costo de la misma, tal como se puede apreciar en la Tabla 57.

Tabla 57

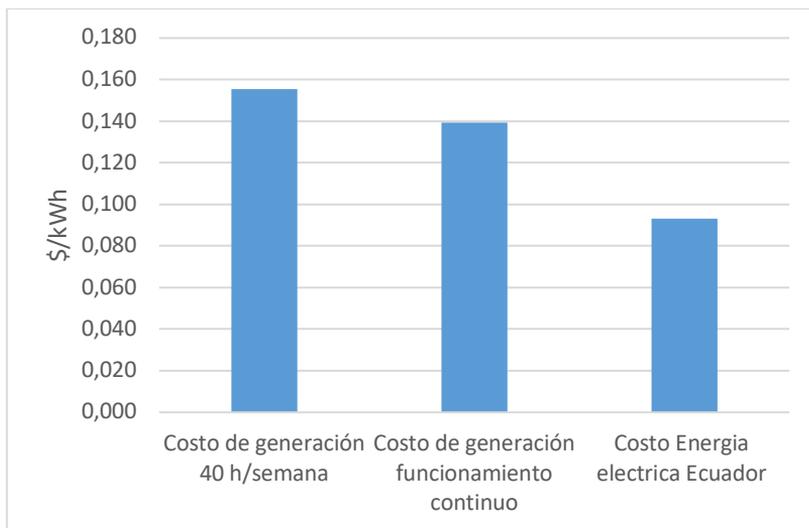
Costo de generación de energía eléctrica funcionamiento continuo 120 horas.

GENERACION ELECTRICA FUNCIONAMIENTO CONTINUO 120 horas semanales, 4800 kg biomasa		
Costo de Transporte de biomasa	62,09	\$/semana
Costo de operación del gasificador	581,38	\$/semana
Potencia térmica del gasificador	128,34	kW
Potencia eléctrica del gasificador	38,502	kW
Costo de generación	0,139	\$/kWh
Costo Energía eléctrica Ecuador	0,093	\$/kWh

El costo de generación para fines eléctricos baja de 15,6 a 13,9 ctv\$/kWh en funcionamiento continuo. Sin embargo, a pesar de esta reducción, el costo de generación es aún mayor al costo de consumo eléctrico planillado en el Ecuador que es 9,3 ctv\$/kWh (Figura 54).

Figura 54

Precios comparativos entre el costo de generación eléctrica.



Nota. Costo Energía eléctrica: (Agencia de Regulación y control de la electricidad ARCONEL, 2017)

La biomasa como recurso energético representa una huella de carbón neutro. Al ser utilizada como una alternativa a las energías convencionales, en este caso el GLP y la energía eléctrica, presenta una cantidad de carbono no emanado al medio ambiente. A esto se le conoce como bonos de carbono los mismos que en la actualidad representan un mercado que está siendo practicado por varios proyectos a nivel nacional. Un bono de carbono representa una licencia para la emisión de una tonelada de CO₂ (tCO₂) o, de ser otros gases de efecto invernadero, una tonelada equivalente del mismo (teqCO₂).

La comercialización de estos bonos se realiza por medio de diferentes mecanismos en un entorno conocido como Mercado de carbono, como en todo mercado existe una oferta y una demanda libre que establecerá los costos. En el Ecuador los proyectos que favorecen a la matriz energética y están vinculados con este mercado como mecanismos de desarrollo limpio (MDL) son de tipo hidroeléctricos, tratamiento de desechos, recuperación de gas y eficiencia energética mayoritariamente cuyo costo promedio de bono de carbono es de 13,03 \$/tCO₂ (Gallegos Garzón, 2012).

En este sentido se puede calcular la cantidad de dióxido de carbono que se podría evitar emitir al ambiente con el uso del gasificador actual para generación térmica y generación eléctrica como se presenta en la Tabla 58.

Tabla 58

Factores de emisión de carbono por fuente de energía.

FACTORES	
2,94	kg CO ₂ /kg GLP
0,271	kg CO ₂ /kW h electric

Nota. Adaptado de (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016)

En la Tabla 59 se indica el valor económico por la venta de los bonos de carbono en los tres casos de generación de energía a través de la gasificación.

Tabla 59*Cálculo de bonos de carbono en gasificación actual.*

GENERACION	Equivalencia en consumo de GLP [kg GLP/ semana]	Equivalencia en consumo eléctrico [kWh/ semana]	Emisión de carbono ahorrado [tCO2/ semana]	Ingreso por venta bono de carbono [\$/ semana]
Energía térmica 40 horas	395,81		1,16	15,16
Energía eléctrica 40 horas		1540,08	0,42	5,44
Energía eléctrica funcionamiento continuo		4620,24	1,25	16,31

Como se puede observar el valor de ingresos por la venta de bonos de carbono a esta escala de generación térmica o eléctrica son pequeños, lo cual no influenciaría mayoritariamente en el costo del kWh generado en cualquiera de los casos. En la Tabla 60 se indica la disminución en costos de generación y para poder apreciar de mejor manera véase la Figura 55.

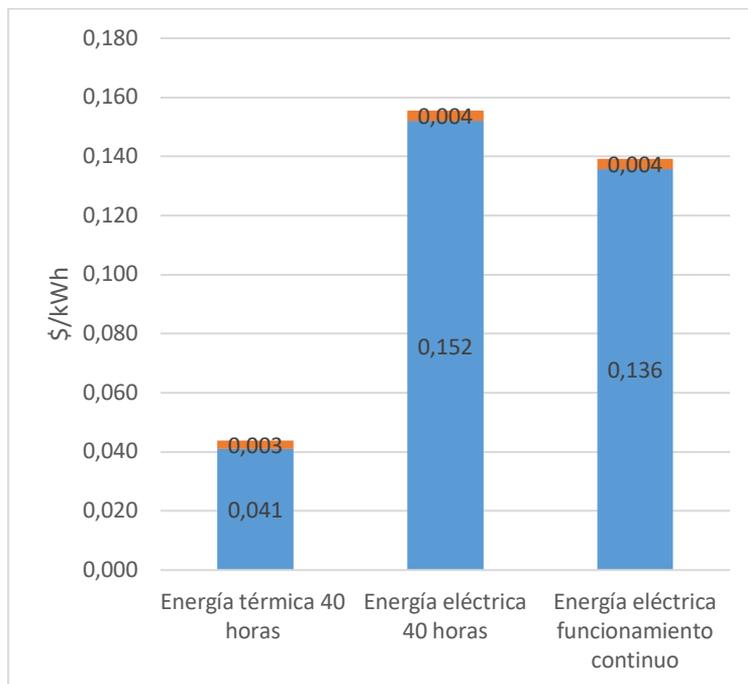
Tabla 60

Cálculo de disminución de costos de generación con bonos de carbono.

	Sin bono de CO2 [\$/kWh]	Con bono de CO2 [\$/kWh]	Disminución de costos de generación [%]
Energía térmica 40 horas	0,044	0,041	6,72
Energía eléctrica 40 horas	0,156	0,152	2,27
Energía eléctrica funcionamiento continuo	0,139	0,136	2,54

Figura 55

Ahorro de costos de generación con bonos de carbono.



Al vender los bonos de carbono la forma de generación que se vería beneficiada de mejor manera es para uso térmico con una reducción de costos del 6,72%, esto se debe a que el factor de emisión por la quema de GLP es más alto que aquel generado por las fuentes eléctricas en nuestro país.

Finalmente, si la generación eléctrica se destina a la venta a entidades del estado, los precios de pago por producción de centrales no convencionales son los que se muestran en la Tabla 61.

Tabla 61

Precios de energía eléctrica producida con recursos energéticos no convencionales.

CENTRALES	PRECIO [ctv\$/kWh]
Eólicas	9,39
Fotovoltaicas	52,04
Biomasa y biogas	9,67
Geotérmicas	9,28
Pequeñas centrales hidroeléctricas de hasta 5MW	5,80
Pequeñas centrales hidroeléctricas de 5MW a 10MW	5,00

Nota. Adaptado de (Regulación CONELEC – 009/06).

El costo de venta correspondiente de la energía eléctrica para el caso de estudio con el gasificador actual sería de 9,67 ctv\$/kWh, frente a un costo de generación calculado 13,60 ctv\$/kWh en el mejor de los casos. Claramente se nota que el

costo de generación es 3,93 ctv\$/kWh (40,64 %) más alto que el costo de venta.

3.2.3. Viabilidad en la implementación de una planta piloto

Para evaluar la implementación de una planta piloto, el punto de partida es la cantidad de recurso biomásico forestal se encuentra disponible, esto determinará la potencia de generación de la misma. Según la Tabla 35 se tiene la cantidad de biomasa forestal total para uso energético y también el valor energético que representa considerando los distintos tipos y su humedad. En la experimentación se obtiene los valores de eficiencia en frío del gasificador downdraft, mismo que se encuentra cercano al valor teórico de trabajos similares como se observa en la Tabla 47. Teniendo en cuenta estos parámetros, y el equipo de gasificación existente en la Tabla 62 se indican de manera resumida todos los valores.

Tabla 62

Condiciones de la planta de implementación.

PLANTA DE IMPLEMENTACIÓN		
Biomasa total	10,634	t/semana
Energía disponible de biomasa	39,34	MWh/semana
Eficiencia en frío	72,82	%
Tipo de funcionamiento continuo	168	h/semana
Potencia térmica de la planta	128,34	kW

Este valor de potencia térmica de la planta 128,34 kW (0,128 MW), Tabla 45, indica que la escala de la planta es pequeña, por lo que hablar de la utilización de turbinas a vapor en un ciclo Rankine o a gas en un ciclo Brayton simple o con cogeneración resulta poco viable por los costos de implementación de este tipo de centrales, esquema de la Figura 56. Estas plantas generalmente son destinadas al procesamiento de 1,3 MW en adelante, como se indica en la Tabla 63 (Cadena, Mora, & Pérez, 2012). En la actualidad la planta instalada en la ESPOCH sirve para fines investigativos y didácticos que ayudan al desarrollo y evaluación local de energías renovables.

Tabla 63

Máximas potencias instaladas.

TASA DE RECUPERACIÓN DE GAS	TECNOLOGÍA UTILIZADA	POT. MAX. INSTALADA [MW]
	MCI	1,34
Baja	Ciclo combinado	1,34
	Microturbina	1,12
	MCI	1,61
Media	Ciclo combinado	1,61
	Microturbina	1,34
	MCI	2,15
Alta	Ciclo combinado	2,15
	Microturbina	1,79

Nota. Adaptado de (Cadena, Mora, & Pérez, 2012).

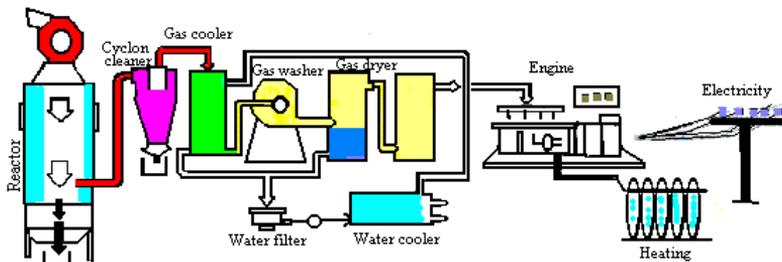
De lo mostrado anteriormente la opción, es la Gasificación de biomasa y grupo electrógeno (motor de combustión interna de gas y generador). El costo de implantación de una planta de generación con grupo electrógeno es en promedio de 2000 \$/kW. (Cadena, Mora, & Pérez, 2012). Considerando la energía producida estimada para la planta de 166, 21 kW el costo de implementación sería.

$$Costo_{implementacion} = 332420 \$$$

Al tomar en cuenta el costo de generación calculado anteriormente de 13,60 ctv\$/kWh y el reciente cálculo del costo de implementación se identifica que la tecnología de generación a la escala planteada del estudio es aún muy costosa para nuestro medio. Además de la desventaja del costo de venta de generación de energía eléctrica que no es económicamente rentable pues no hay un porcentaje de ganancia.

Figura 56

Esquema de sistema de generación con grupo electrógeno.



En la Tabla 64 se presenta un análisis FODA para la implementación de la planta piloto de gasificación para el caso de estudio.

Tabla 64

Análisis FODA.

FORTALEZAS	DEBILIDADES
Recurso para acopio gestionable de buenas características, 47% aserrín, 23% viruta, 18% madera trozada.	Costos de generación superiores al costo de venta en el mercado energético actual.
Disponibilidad del equipo de gasificación con un sistema de acondicionamiento de gas.	Disponibilidad limitada al comercio de sector maderero.
Gas pobre producido de características óptimas en comparación a los estudios similares.	Costos operativos de transporte de la biomasa representan el 10% del valor total de generación.
Generación de empleo directo e indirecto.	Necesidad de inversión en tecnología costosa actualmente.
Energía limpia con emisiones neutras de carbono.	
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
Optimización de recursos biomásicos residuales de la industria maderera sin usos finales en la cadena industria.	Incentivos a la utilización del GLP manteniendo el subsidio actual.
Posibilidad de desarrollo de nueva tecnología en el medio nacional, con la finalidad de mejorar costos de generación eléctrica y térmica por medio de gasificación.	Desconocimiento y falta de apoyo institucional para el desarrollo.
Contribución a la soberanía y seguridad energética.	Utilización de la biomasa en otro tipo de industria como materia prima.
Posibilidad de estudios en otras localidades ecuatorianas	

3.3. Conclusiones del capítulo y generales

- En el cantón Riobamba, casi la totalidad de la industria maderera se realiza dentro de la periferia urbana y no en el sector rural, llegando a ser el 99,5% de participación de las parroquias urbanas. Esto facilita la posibilidad de acopio de la biomasa residual de dicha industria dado que al movilizarse dentro de la ciudad se cuenta con líneas de fácil acceso, además de una distancia de recorrido relativamente corta en comparación si fuese en las zonas rurales. Deja también abierta la puerta de generación de empleo por la operación de una planta de gasificación se estaría ampliando en la urbe y no en lo rural.
- La cantidad de materia prima de madera procesada en cada sector no guarda una relación directa con la cantidad de generación de residuos biomásicos de esta industria disponibles para uso energético. Esto se debe a que en general los establecimientos industrializados aprovechan al máximo sus recursos, de tal manera que los residuos tienen previsto un determinado fin comercial o industrial, por tanto no se los puede usar para usos energéticos. Por otro lado los establecimientos de escalas menores no contemplan con certeza un plan de uso final de los residuos y son los mayores aportantes de biomasa forestal residual para fines energéticos.

- La biomasa forestal residual de industria maderera disponible para fines energéticos se contempla a través de la donación de los propietarios de los establecimientos, son recursos que no tienen un uso final específico y tampoco altera la dinámica económica de los establecimientos. Los diversos usos que tiene dicha biomasa en los distintos sectores contemplan la venta, desecho, quema, regala, abono y usos varios. En el caso de estudio a través de las encuestas se detectó que todo aquello que es desechado representa el 19%, es decir 11,6 t, este valor es casi coincidente con el recurso biomásico disponible para fines energéticos (10,61 t) y tiene su conjetura ya que como se mencionó anteriormente, la biomasa disponible para energía se obtiene del acopio de las donaciones.
- La etapa experimental provee de las características y parámetros reales tanto del gas pobre producido por gasificación downdraft. Los datos más relevantes de esta sección son el análisis cromatográfico del gas el cual presenta un poder calorífico de 5,198MJ/kg y a su vez este conlleva a la determinación de la eficiencia en frío del gasificador que es 72,28%. Estos valores al compararse con estudios realizados en el año 2002, 2009 y 2010 son muy similares. Sin esta etapa el estudio se alejaría de las condiciones locales reales donde se pretende aprovechar el recurso biomásico.

- El análisis económico del proceso de gasificación revela que el costo de generación para fines térmicos 0,044\$/kWh es viable si se compara con el costo de utilización del GLP a precios internacionales 0,078\$/kWh. El costo energético del uso de GLP en el país al estar subsidiado es muy bajo 0,008\$/kWh, si bien este precio beneficia a un gran sector de la población, conlleva también a un golpe económico al estado de gran tamaño y va de la mano con la falta de uso racionalizado del mismo.
- Los usos de este gas producido pueden ser la generación térmica o la eléctrica, para la generación térmica se puede tener una planta intermitente que trabaje 40 horas semanales supliendo las necesidades de calefacción, cocción y agua caliente sanitaria. Una generación permanente térmica podría quedar subutilizada en horas de la noche y madrugada en tanto que una planta para generación eléctrica presenta características favorables para la generación continua, inclusive como muestra el análisis económico el costo de generación mejora respecto a si fuese intermitente diariamente de 0,156\$/kWh a 0,139\$/kWh. La energía generada en horario nocturno y de madrugada quedaría destinado a la iluminación.

- Las plantas de generación de biomasa dedican su trabajo a la conversión de dicha energía en forma eléctrica. Para procesos de eficiencias totales mejoradas como una gasificación integrada de ciclo combinado, es decir cogeneración, es necesario contar con potencias a procesar por encima de 1,5 MW y los costos de instalación superan los 3000 \$/kW instalado. Si el panorama no está en esta magnitud, como en el caso de estudio $E_{Disp} = 39,34 \text{ MWh/semana}$ que equivale a una planta de funcionamiento continuo de 0,23 MW; la mejor opción es un grupo electrógeno, cuya eficiencia global dependerá en gran medida del motor de combustión, ya que el gasificador en óptimas condiciones rodea el 75%, pero el costo de implementación estará acorde al tamaño de la planta que es 2000 \$/kW en promedio.

3.4. Observaciones post investigación para tener presente.

- Con el estudio realizado se pudo identificar y cuantificar la biomasa forestal residual de la industria maderera aprovechable en el cantón Riobamba. Los instrumentos de recolección de datos realizadas no solo levantaron información específica de la biomasa sino también la cantidad y tipo de materia prima que utilizan los establecimientos, lo cual sirvió sustancialmente para determinar la masa y densidad de la madera al llevar a

unidades comunes de medición a todas las especies forestales. Se debería incorporar en los futuros censos económicos a nivel nacional este tipo de indagaciones en especial en las provincias que poseen mayor actividad maderera como son Cotopaxi, Pichincha, Los Ríos, Imbabura y Santo Domingo.

- Los distintos tipos de residuos forestales de la industria maderera poseen características particulares como es la densidad y poder calorífico, es importante para el estudio que estos valores se encuentran tabulados bajo normativas internacionales. Para casos específicos, como por ejemplo un proyecto que conlleve al diseño e implementación de una planta de gasificación en un determinado lugar o industria, se recomienda que dichas características sean analizadas en el laboratorio a través de tomas de muestras de los tipos de residuos de la localidad, por temas de exactitud en los cálculos energéticos. Las propiedades y características del recurso biomásico es de vital importancia cuando de enfoque energético se trata, la variación en su composición como en su humedad determinan el poder calorífico. Valores errados en esta propiedad podrían ocasionar resultados que sobreestimen o subvaloren la realidad disponible
- En la actualidad existe un estudio de biomasa forestal para todo el país, mismo que se indica en la obra titulada

Atlas bioenergético (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2014). En la metodología de este Atlas detallan que las estimaciones de potenciales energéticos se basan en datos teóricos de aprovechamiento biomásicos de las especies forestales. Este parámetro teórico indica que el 70% de un árbol es biomasa, pero no todo ese porcentaje puede ser aprovechado para energía, pues el mismo consta de ramas, raíces, corteza, aserrín, entre otros. El verdadero valor del potencial energético resulta del estudio particularizado del entorno al conocer la cantidad de materia prima, cantidad de residuos generados, usos previstos para los mismos y la cantidad desechada que no posee destino final. Se recomienda para futuros estudios en área de energías renovables, en particular de biomasa, hacer un estudio particular en el sitio y no solo realizar estimaciones con valores teóricos.

- Con los costos de generación térmica 0,044\$/kWh para la gasificación downdraft, se recomienda que las plantas industrializadas como aserraderos a gran escala consideren esta tecnología limpia como una parte de sus energéticos, si bien la ventaja económica frente a un combustible fósil a precios nacionales no es atractiva se estaría actuando de manera ética y eficiente con los recursos. Una alternativa sería promover políticas gubernamentales que alienten el uso de esta tecnología.

Referencias bibliográficas

- Agencia Nacional de Tránsito. (agosto de 2017). *Agencia Nacional de Tránsito*.
<http://www.ant.gob.ec/index.php/component/content/article/74-tarifas/1425-tarifas-chimborazo-2016>
- Agencia de Regulación y Control de la Electricidad. (agosto de 2017). *Pliego tarifario para las empresas eléctricas*. ARCONEL. <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/01/Pliego-y-Cargos-Tarifarios-SPEE-2017.pdf>
- Basu, P. (2013). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. Elsevier.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: Practical Design*. Academic Press, Elsevier.
- Cabrera, R., Madriñán, S., & Muñoz, D. (junio de 2012). Caracterización del gas de síntesis obtenido a partir de algaborro y bagazo de caña. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial Colombia*, 10(1), 166-173.

<http://revistabiotechnologia.unicauca.edu.co/revista/index.php/biotechnologia/article/viewFile/226/187>

Cadena, J., Mora, J., & Pérez, S. (2012). Análisis de viabilidad financiera de una central de generación de energía eléctrica a partir de biogás. *Scientia et Technica*, 1-7. <https://www.google.com.ec/url>

Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa* (4ta. ed.). McGraw Hill.

Contraloría General del Estado. (agosto de 2017). *Salarios mano de obra*. [Archivo PDF]. <http://www.contraloria.gob.ec/Informativo/SalariosManoO>
bra

Echeverri Londoño, C. A. (2008). Diseño de filtros de talegas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 7(12), 18. <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/199>

Energy Research Centre of the Netherlands. (2012). *ECN Phillis2*. <https://www.ecn.nl/phyllis2/>

GAD provincial de Chimborazo. (28 de 07 de 2015). *GAD provincial de Chimborazo*.
<http://www.chimborazo.gob.ec/chimborazo/?p=410>

Gallegos Garzón, M. (2012). Análisis mercado de carbono en Ecuador. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 168-184.
<http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/ec/2012/magg.htm>
I

García Fernández, L. E. (2011). *Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia].
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7686>

Global Prices. (mayo de 2017). *Global Prices*.
http://www.globalpetrolprices.com/lpg_prices/

Heraz Segura, A. (2012). *Estudio de gasificación mediante un prototipo experimental para el tratamiento termoquímico de residuos orgánicos*. (Tesis de Maestría, Universidad Iberoamericana). <http://ri.ibero.mx/handle/ibero/549>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2010). *Metodología de la Investigación* (5ta ed.). McGraw Hill.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). *Gas licuado de petróleo. Determinación de la densidad relativa. NTE INEN 684:2013.* INEN.
<http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/684-1.pdf>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). *Medición de caudal de fluidos mediante dispositivos de presión diferencial.* INEN. http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/NORMAS_2014/DRO/nte_inen_iso_5167_1extracto.pdf

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2015). *Norma ecuatoriana de la construcción, Cap 7: Estructuras de madera.* (1ra ed.). INEN.
http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/07/cpe_inen-nec-semd-

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (7 de noviembre de 2016). *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.*
<http://www.ecuadorencifras.gob.ec/informacion-censal-cantonal/>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. (2007). *Biomasa Gasificación.* IDAE.
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf

Krajnc, N. (2015). *Wood fuels handbook.* FAO.
<http://www.fao.org/3/a-i4441e.pdf>

- Lesme Jaén, R., Recio Recio, Á., Preston, T., Rodriguez, L., & Oliva Ruiz, L. (2008). Análisis termodinámico de un gasificador ANKUR modelo WBG-10 trabajando con diferentes biomásas. *Tecnología Química*, 28, 71-77. <http://www.redalyc.org/pdf/4455/445543757009.pdf>
- López, J., & Moscoso, D. (2016). ¿Cómo está la relación entre energía y cambio climático? En J. López, & D. Moscoso, *Cambia la energía, cambia el clima*. Cuenca: FAO, (pp. 4-7). <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0357.pdf>
- Márquez Martínez, M. (2005). *Combustión y quemadores*. Marcombo. <https://books.google.es/books?>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2014). *Propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de 93 especies forestales*. Tallpa Publicidad Impresa. <http://www.fao.org/3/a-i4407s.pdf>
- Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2016). *Balance energético nacional 2016*. MCSE. <http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/balance-energetico/>
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2014). *Atlas Bioenergético del Ecuador*. ESIN Consultora. <http://www.mediafire.com/file/17dz5lbnwloiea6/ATLAS+BI+OENERGETICO+DEL+ECUADOR.zip>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1993). *El gas de madera como combustible para motores*. FAO. <http://www.fao.org/docrep/T0512S/T0512S00.htm>

Organización Latinoamericana de Energía. (13 de mayo de 2014). *OLADE*. <http://www.olade.org/sites/default/files/misiones/OLADE-Renovables-final.pdf>

Organización Latinoamericana de Energía. (4 de mayo de 2017). *Organización Latinoamericana de Energía*. <http://www.olade.org/>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. (2008). *Bosques y Energía, cuestiones clave*. FAO. <http://www.fao.org/3/a-i0139s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2008). *Energía Renovable*. En O. d. *Alimentación, Bosques y energía, cuestiones clave* (pp. 6-9). Roma: FAO. <http://www.fao.org/3/a-i0139s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (3 de mayo de 2017). *Forestry*. <http://www.fao.org/forestry/energy/es/>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. (1991). *Conservación de energía en las*

industrias mecánicas forestales. FAO.
<http://www.fao.org/docrep/t0269s/T0269S00.htm>

Orozco Cantos, L.S.(2017). *Levantamiento y análisis del potencial energético aprovechable de la biomasa forestal en el cantón Riobamba y su viabilidad a través de gasificación tipo Downdraft.* [Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional].

Pratik, N., & Babu, B. (2009). Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft gasifer. *Elsevier*, 3127-3133.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409000480>

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century REN 21. (2016). Energía de Biomasa. En R. 21, *Energías Renovables 2016, Reporte de la situación mundial.* (p. 19). Francia: REN21 Secretariat.
http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf

Serret Guasch, N., Giralt Ortega, G., & Quintero Ríos, M. (2016). Caracterización de aserrín de diferentes maderas. *Tecnología Química*, 36(3), 9.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300012

Yunus, C., & Michael, B. (2011). *Termodinámica*. Mc Graw Hill.

Zainal, Z., Rifau, A., Quadir, G., & Seetharamu, K. (2002).
Experimental investigation of a downdraft biomass
gasifer. *Elsevier*, 7.



ANEXOS

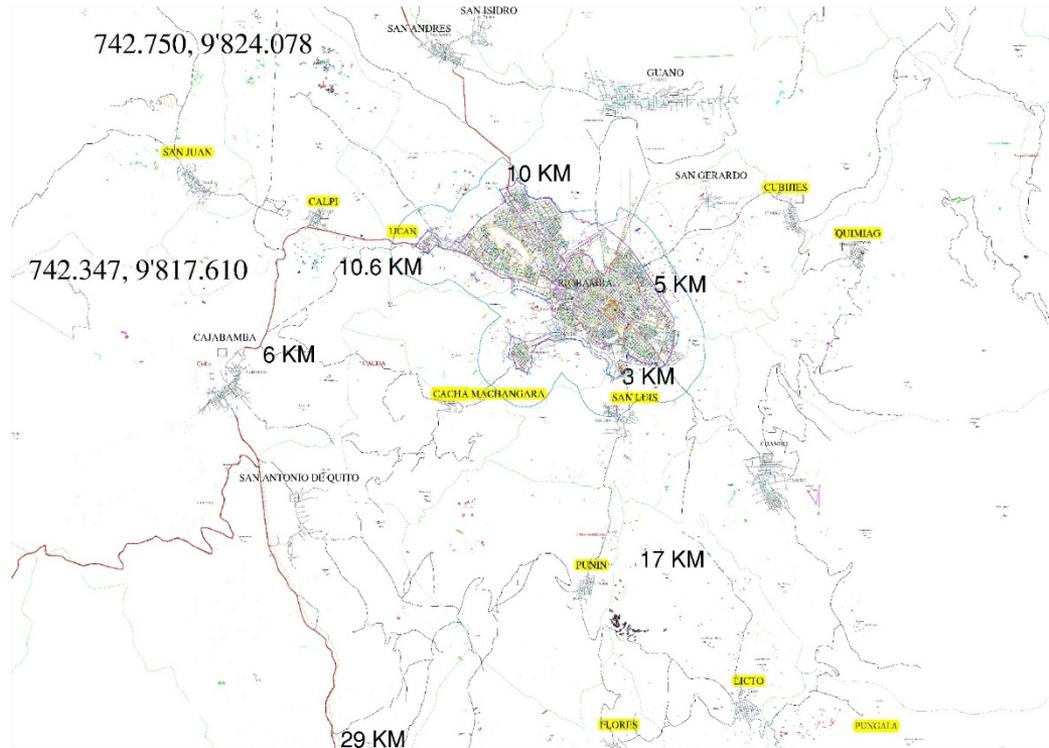
Anexo 1

Mapa con sectores para caso de estudio en Riobamba.



Anexo 2

Parroquias rurales de Riobamba.



Anexo 3

Modelo de encuesta.

N° de encuesta:

Fecha:

Sector encuestado:

Encuestador:

DATOS INFORMATIVOS	
NOMBRE DEL ESTABLECIMIENTO	
DIRECCIÓN DEL ESTABLECIMIENTO	
NOMBRE DEL PROPIETARIO	
TELÉFONO DE CONTACTO	
DIRECCIÓN DE CORREO ELECTRÓNICO	
TIPO DE ACTIVIDAD:	
DETALLAR LA ACTIVIDAD DEL LOCAL ENCUESTADO.	

DATOS TÉCNICOS

¿Qué tipo de materia prima dispone para su proceso productivo y en qué cantidad?

N°	Tipo	Semana	Unidades	Mes	Unidades	Año	Unidades
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Tipos de unidades:

Tablón
Tabla
Troza
Metros cúbicos [m³]

¿Qué clase de desperdicios forestales genera su proceso productivo?

N°	Clase
1	
2	
3	
4	

Especificar dimensiones de las unidades

¿Qué cantidad de desperdicios forestales genera su proceso productivo?

N°	Clase	Semana	Unidades	Mes	Unidades	Año	Unidades
1							
2							
3							
4							

Tipos de unidades

Sacos
Metros cúbicos [m³]

¿Qué destino le da al desperdicio forestal?

N°	Clase	Destino
1		
2		
3		
4		

¿Le implica algún rédito y/o gasto económico deshacerse del desperdicio forestal?

N°	Clase	Gasto \$	Rédito \$	Unidades
1				
2				
3				
4				

Notar que debe estar en función del desecho producido

Tipos de unidades
Sacos
Metros cúbicos [m³]

¿Estaría dispuesto a donar su desperdicios forestales a la ESPOCH con fines investigativos?

N°	Clase	Cantidad	Unidades
1			
2			
3			
4			

Tipos de unidades

Sacos
Metros cúbicos [m³]

Anexo 4

Poder calorífico de la madera según la humedad.

Table 14 Caloric value ($H_i = 18,5$ MJ per kg) as function of water content (M %)[3]

M (%)	MWh per tonne	GJ per tonne		M (%)	MWh per tonne	GJ per tonne
15	4.27	15.36		38	2.93	10.54
16	4.21	15.15		39	2.87	10.33
17	4.15	14.94		40	2.81	10.12
18	4.10	14.73		41	2.76	9.91
19	4.04	14.52		42	2.70	9.71
20	3.98	14.31		43	2.64	9.50
21	3.92	14.10		44	2.58	9.29
22	3.86	13.89		45	2.52	9.08
23	3.80	13.68		46	2.47	8.87
24	3.75	13.47		47	2.41	8.66
25	3.69	13.27		48	2.35	8.45
26	3.63	13.06		49	2.29	8.24
27	3.57	12.85		50	2.23	8.03
28	3.51	12.64		51	2.17	7.82
29	3.45	12.43		52	2.12	7.61
30	3.40	12.22		53	2.06	7.40
31	3.34	12.01		54	2.00	7.19
32	3.28	11.80		55	1.94	6.98
33	3.22	11.59		56	1.88	6.77
34	3.16	11.38		57	1.82	6.56
35	3.11	11.17		58	1.77	6.35
36	3.05	10.96		59	1.71	6.15
37	2.99	10.75		60	1.65	5.94

Nota. Adaptado de (Krajnc, 2015)

Anexo 5

Cálculo de propiedades del gas pobre como una mezcla de gases

El gas pobre de madera es una mezcla de gases, como se observa en la siguiente Tabla, por tanto las propiedades de este gas se deben calcular como un promedio ponderado de las propiedades de sus gases componentes.

Tabla 8.1.

Composición volumétrica del gas pobre de madera.

Compuesto	Gas pobre [%]
Monóxido de carbono CO	24,04
Dióxido de Carbono CO ₂	14,66
Hidrogeno H ₂	14,05
Metano CH ₄	2,02
Nitrógeno N ₂	43,62

Nota. Adaptado de (Zainal, Rifau, Quadir, & Seetharamu, 2002)

Esta Tabla contiene los valores referenciales de la composición elemental del gas pobre de madera, para un caso particular de estudio se debería utilizar la composición obtenida del laboratorio.

La composición volumétrica es necesario convertirla a composición másica a través de la siguiente ecuación.

$$x_i = \frac{y_i M_i}{\sum y_i M_i} \quad \text{Ec. 8.1}$$

Donde:

x_i es el porcentaje másico del constituyente i en $\frac{kg_i}{kg}$

y_i es el porcentaje volumétrico del constituyente i en $\frac{kmol_i}{kmol}$

M_i es el valor de la masa molar del constituyente i en $\frac{kg}{kmol}$

Tabla 8.2.

Composición volumétrica, másica y propiedades del gas pobre de madera.

COMPUESTO	y_i [%]	R [$\frac{kJ}{kg K}$]	Cp [$\frac{kJ}{kg K}$]	M [$\frac{kg}{kmol}$]	x_i [%]
CO	24,04	0,2968	1,040	28,011	25,9
CO2	14,66	0,1889	0,846	44,01	24,8
H2	14,05	4,124	14,307	2,016	1,1
CH4	2,02	0,5158	2,2537	16,043	1,2
N2	43,62	0,2968	1,039	28,013	47,0

Nota. Para el valor de las propiedades R, Cp y M se usa el Software EES. x_i se calcula con la ecuación 8.1.)

El calor específico a presión constante del gas pobre se lo obtiene en base a la teoría del cálculo de propiedades de una mezcla de gases, con la siguiente ecuación:

$$Cp_g = \sum Cp_i (x_i) \quad \text{Ec. 8.2.3.2}$$

Donde:

Cp_i es el calor específico a presión constante del constituyente i en $\frac{kJ}{kg K}$

$$Cp_g = 1,151 \frac{kJ}{kg K}$$

El valor de la constante particular del gas pobre se lo obtiene como una mezcla, de la siguiente ecuación:

$$R_g = \sum R_i (x_i) \quad \text{Ec. 8.3.}$$

Donde:

R_g es la constante particular del gas pobre en $\frac{kJ}{kg K}$

R_i es la constante particular del constituyente en $\frac{kJ}{kg K}$

$$R_g = 0,3144 \frac{kJ}{kg K}$$

El valor de la densidad del gas estimado a una temperatura de 95 °C (temperatura promedio entre T_{g2} y T_{g1}) del gas pobre se obtiene usando la ecuación de estado.

$$\rho_g = \frac{p_{atm}}{R_g T_g} \quad \text{Ec. 8.4.}$$

Donde:

ρ_g es la densidad del gas pobre que pasa por el enfriador estimada a 95 °C.

$p_{atm} = 72875 Pa$ es la presión atmosférica de Riobamba.

$$\rho_g = 0,6298 \frac{kg}{m^3}$$

Para el cálculo de la entalpía del gas, se lo resuelve tomando en cuenta el análisis de laboratorio de cromatografía, Anexo 9.

$$h_{gas} = \sum h_i (y_i) \quad \text{Ec.8.5}$$

Donde:

h_i es el valor de la entalpía del constituyente i, en las mismas condiciones de la mezcla, en MJ/kg, software EES Professional V9.

y_i es la fracción molar del compuesto i. Se obtiene de los resultados de laboratorio cromatográfico realizados. Anexo 9.

Tabla 8.3.

Composición volumétrica y cálculo de la entalpía del gas pobre de madera.

COMPONENTE	y_i [%]	h_i [MJ/kg]	$h_i (y_i)$ [MJ/kg]
H2	26,28	5,011	1,3169
CO	7,06	0,4724	0,0334
CO2	40,7	0,1615	0,0658
CH4	7,6	0,4357	0,0331
N2	16,38	0,4922	0,0806
Etano	0,99	0,3694	0,0037
O	0,28	0,1639	0,0005
			1,5338

$$h_{gas} = 1,5338 \text{ MJ/kg}$$

Anexo 6

Propiedades de gas ideal aire.

Propiedades de gas ideal del aire											
T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

Nota. Adaptado de (Yunus & Michael, 2011)

Anexo 7

Propiedades del aire a la presión de 1 atm.

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-30607020-8.

Nota. Adaptado de (Cengel & Ghajar, 2011)

Anexo 8

Listado, dirección y ubicación de establecimientos encuestados en el cantón Riobamba.

DIAGNOSTICO DEL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS FORESTALES PARA USO ENERGÉTICO EN EL CANTÓN RIOBAMBA

Datos de los establecimientos y propietarios encuestados

No.	Sector	#	Propietario	Nombre del establecimiento	Dirección del establecimiento
1	1.a	1	Gonzalo Barahona	Mueblería Santana	Av. Panamericana Sur y Congos
2	1.b	2	Mario Horna	Taller y Carpintería de Mario Horna	Av. Panamericana Sur y Santana de Tapi
3	1.e	3	Aida Cruz	Aserradero Modeno	Av. Panamericana Sur y Río Coca
Sector 2 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
4	2.a	1	Oscar Coleha	-	Av. Manabi y Calle las Rieles
5	2.b	2	-	-	Av. Mons. Leonidas Proaño y El Oro
6	2.c	3	-	Bradeni Decoración	Av. Edulbalo y Calle sin Nombre
7	2.d	4	-	-	Av. Río Cutudá y Río Dande
8	2.e	5	Manuel Valdez	-	Av. Mons. Leonidas Proaño y Luciano Andrade
Sector 3 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
NO EXISTEN ESTABLECIMIENTOS					
Sector 4 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
9	4.a	1	Javier Cando	Muebles San José	Av. Canónigo Ramos y Aracely y Gilbert
10	4.b	2	Jorge Eivera	Muebles San Jorge	Manuel Rendón y simonina
11	4.c	3	Ángel Lago	Ángel Lago	Miguel de Santiago y Sangorima
12	4.d	4	Dyron Machado	Ebano Mueblería	Av. Canónigo Ramos y Joaquín Pinto
13	4.e	5	Jaime Delgado	Fábrica de muebles Chimborazo	Joaquín Pinto y Caspicara
14	4.f	6	Gabriel Correa	Madermetal	Av. Canónigo Ramos y Aracely y Gilbert
15	4.g	7	Jorge Rivas	Líneas y muebles	Av. Canónigo Ramos y Sergio Guarderas
16	4.h	8	Sr. Machado	Mueblería Machado e hijos	Av. Canónigo Ramos y Nicolás Delgado
Sector 5 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
17	5.a	1	David Urrutia Yambay	David Urrutia	Antonio Salas y Miguel de Santiago
18	5.b	2	Juan Condrias	Fabri Mueble	Guayas y Aztecas
19	5.e	3	Ing. Javier Barba	Aserradero Barba	Av. Canónigo Ramos y Miguel de Santiago
Sector 6 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
20	6.a	1	Juán García	Creartys Muebles	Panamericana sur km 2
21	6.b	2	Julio Nono	Mueblería Arte en madera	Av. Pedro Vicente Maldonado y Martín Arcola
22	6.c	3	Pedro Carpi	Deposito de madera	Av. Pedro Vicente Maldonado y Diego de Olivo
23	6.d	4	Segundo Ocaña	Fábrica de muebles "SY Muebles"	Av. Pedro Vicente Maldonado y Marcos Aleoca
24	6.e	5	Manuel Quintana	Aserradero San Pedro de Riobamba	Av. Pedro Vicente Maldonado y Marcos Aleoca
25	6.f	6	Marco Saghai	Ebanistería "Marlon"	Av. Pedro Vicente Maldonado y Cofanes
26	6.g	7	Miguel Hernández	muebles "carmita"	Av. M.L. Proaño y Alfonso Pérez Salazar
27	6.h	8	Marta Pilla	Aserradero San Pablo	Av. M.L. Proaño y Esteban Marañón
28	6.i	9	Marco Altamirano	Aserradero Marcos	Av. M.L. Proaño y Manuel Barros
Sector 7 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
29	7.a	1	Barón scgo	Contar mueble	López de Armandaris y Gaspar Escalona
30	7.b	2	Paulina Allanca	Plastimueble	Av. Pedro Vicente Maldonado
31	7.c	3	Luis Aleocer	Muebles Teciarte	Pedro Vicente Maldonado
32	7.d	4	Segundo Ocaña	Madermueble	Av. Pedro Vicente Maldonado y Armentuáns
33	7.e	5	Carlos Yautian	Mueblería Israel	José Peralta y Pedro Franco
Sector 8 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
34	8.a	1	Iván Guaranda	Muebles Juan	Francisco Flor y Manuel Albán
35	8.b	2	Ángel Guachilena	Carpintería "El Cabañero"	Pedro Vicente y 9 de Octubre
36	8.c	3	Carlos Lema	Depósitos "La Fosita"	Pedro Vicente y Abdón Calderón
37	8.d	4	Juan Cifuentes	-	Riobamba y San Juan
Sector 9 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
38	9.a	1	Ing. Iván Moran	Empresa Durini Edúmea Riobamba	Av. La Prensa y José María Banderas
39	9.b	2	Carlos Vimos	Imperio del Mueble	Francisco Roca y Manuel Quintero
40	9.c	3	Enrique Manzano	Aserradero "LA DOLOROSA"	Manriquez de Miraflores y Luis San
Sector 10 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
41	10.a	1	Arquímedes Vasco	La Mueblería	Av. Saint Amund Montread y Pablo Palacios
42	10.b	2	-	Mueblería Idilo	Panamericana Sur
43	10.c	3	Bolívar Ponce	Mueblería Ponce	Av. Saint Amund Montread
Sector 11 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
44	11.a	1	Giovanny Vargas	-	Entre Diego de Ibarra y Nueva York
45	11.b	2	Serafin Bustanio	-	Entre José de Orozco y Carlos Zambrano
46	11.c	3	Wilson Guzmán	Carpintería Danny	Nueva York y Juan la valle (esquina)
47	11.d	4	Eduardo Tapia	-	Entre Juan y los Arroyos
48	11.e	5	Marcelo Navas	-	José de Orozco y los Arroyos
Sector 12 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
49	12.a	1	José Villagómez	Novocentro-Ecomadera	Unidad Nacional y Condorazo
Sector 13 # Propietario					
Nombre del establecimiento Dirección del establecimiento					
50	13.a	1	Edison Estévez	Carpintería "Entre Maderas"	Edmundo Charboga y Arzueña.
51	13.b	2	Luis Herrera	-	Velasco Ibarra y Borrero
52	13.c	3	Ernesto Guadamán	-	Av. Antonio José de Sucre y Gdo Plaza
53	13.d	4	Juan Carlos Gasplucem	-	Velasco Ibarra y Francisco Bossles
54	13.e	5	Juan Tototy	-	Calle 21 de Abril y Lizardo García
55	13.f	6	-	Prodimueble	Av. Antonio José de Sucre y Leonidas Plaza
56	13.g	7	Regulo Efraín Padilla	Aserradero Madera Constructores	Av. Antonio José de Sucre y Cordobés
57	13.h	8	-	Carpintería " El Río "	Luis A Martínez y Av. Antonio José de Sucre
58	13.i	9	Alberto Teneda	Depósito y Aserradero "Don Alberto"	Av. Circunvalación y García Moreno
59	13.j	10	Eliza Alvarado	Aserradero "El Tablón"	Av. Circunvalación y Larrea
60	13.k	11	Alonso Zumba	Depósito Zumba	Av. Circunvalación y Larrea
61	13.l	12	Paola Negrete	Aserradero "Paola"	Av. Circunvalación y Colón
62	13.m	13	Luis Moyota	Aserradero "Arbolito"	Av. Circunvalación y Colón
63	13.n	14	José Ambi	Aserradero "Santa Rosa"	Av. Circunvalación y Colón
64	13.o	15	Johnny Chumbo	Aserradero "Johnny"	Av. Circunvalación y Av. Alfonso Chávez
65	13.p	16	Segundo Vilema	-	Otto Aroseña y Av. Alfonso Chávez

Anexo 9

Cromatografía de gases realizadas en el laboratorio de la EPN.



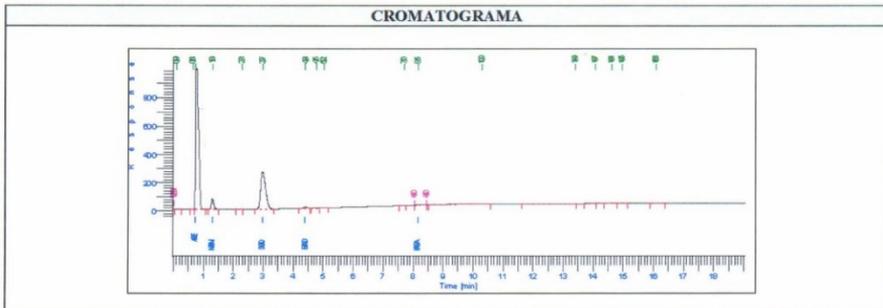
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
LABORATORIO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL

SUPLEMENTO DEL REPORTE DE ANÁLISIS LAI-17-039
OT. 5284

DATOS GENERALES			
Muestra	Gas de síntesis	Fecha de inicio del ensayo	18/07/2017
Cliente	Lemin Orozco	Fecha final del ensayo	20/07/2017
Fecha de recepción de muestra	18/07/2017	Fecha de impresión	27/07/2017
Observaciones	El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución		

CONDICIONES DE TRABAJO			
Temperatura (°C)	20	Norma de referencia	ASTM D 1945-03 (2010)

RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Peso	% Moles
	Hidrógeno		1.98	26.28
	Oxígeno		0.33	0.28
	Nitrógeno		17.16	16.38
	CO		7.40	7.06
	Metano		4.56	7.60
	CO2		66.99	40.70
	Etano		1.11	0.99
	Agua		0.48	0.71
	Total		100.00	100.00
PROPIEDADES	Densidad relativa		0.93	
	Peso molecular promedio [g/mol]		26.74	
	*Poder calorífico superior a 25°C [Btu/lb]		2864.95	
	*Poder calorífico inferior a 25°C [Btu/lb]		2229.13	



Ing. Lucia Montenegro	Ing. Gabriela Pérez
Jefa del Laboratorio de Análisis Instrumental	Especialista en técnicas de Análisis Químico

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL
Quito - Ecuador

CIDE
EDITORIAL



ISBN: 978-9942-679-11-6



9789942679116