

**DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE MADUREZ Y LAS CAPACIDADES DE LAS
TECNOLOGÍAS EXISTENTES PARA LA TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA
RESIDUAL EN ENERGÍA ELÉCTRICA.**



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

**EDISON RICARDO ROJAS MANRIQUE
DAVID FERNANDO RUIZ MÉNDEZ**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.- 2018**

**DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE MADUREZ Y LAS CAPACIDADES DE LAS
TECNOLOGÍAS EXISTENTES PARA LA TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA
RESIDUAL EN ENERGÍA ELÉCTRICA.**

**EDISON RICARDO ROJAS MANRIQUE
DAVID FERNANDO RUIZ MÉNDEZ**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:
INGENIERO MECÁNICO

Director:

Germán Arturo López Martínez

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
PROYECTO CURRICULAR INGENIERIA MECÁNICA
BOGOTA D.C.- 2018**

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

NOTA DE ACEPTACIÓN

Germán Arturo López
Martínez.

Director

Jurado

TABLA DE CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	15
2. JUSTIFICACIÓN.....	16
3. OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GENERAL	17
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	17
4. ESTADO DEL ARTE.....	18
4.1 BIOMASA.....	18
4.1.1 Clasificación biomasa	18
4.1.2 Clasificación de la biomasa residual por sector productivo	19
4.1.3 Transformación energética de la biomasa	22
5. METODOLOGÍA	26
5.1.1 Clasificación de las tecnologías de transformación.....	26
5.1.2 Eficiencias de conversión.....	27
5.1.3 Determinación de las capacidades máximas de procesamiento en cada tecnología	27
5.1.3.1 Capacidades de producción de las tecnologías de transformación de biomasa en biocombustibles	28
5.1.3.2 Selección de biocombustible y rendimiento de conversión en cada tecnología	29
5.1.3.3 Potencia eléctrica de referencia.....	29
5.1.3.4 Capacidades de procesamiento	30
5.1.4 Vigilancia tecnológica.....	30
5.1.5 Determinación del nivel de madurez	30
5.1.6 Costo de producción total y unitario de electricidad	34
5.1.6.1 Costos de operación.....	34
5.1.6.2 Cálculo de costos fijos.....	36

5.1.6.3	Cálculo de otros costos	37
5.1.6.4	Generación de potencia	38
5.1.6.5	Resultados finales	38
6.	TECNOLOGÍAS DE TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA EN BIOENERGÍA.....	40
6.1	TECNOLOGÍAS MECÁNICAS	41
6.1.1	Vigilancia tecnológica de Pellets de biomasa	45
6.2.2	Capacidad de procesamiento plantas de pellets.....	46
6.2.3	Nivel de madurez.....	49
6.2.4	Costos de producción total y unitario de electricidad.....	50
6.2	TECNOLOGÍAS BIO-QUÍMICAS	51
6.1.1	DIGESTIÓN ANAEROBIA	51
6.2.1.1	Clasificación de Biodigestores anaerobios.....	54
6.2.1.2	Clasificación biodigestores.....	55
6.2.1.3	Capacidad de procesamiento biodigestion.....	59
6.2.1.4	Vigilancia tecnológica de biogás y biodigestores	62
6.2.1.5	Nivel de madurez.....	63
6.2.1.6	Costos de producción total y unitario de electricidad.....	64
6.2.2	FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	66
6.2.2.1	Capacidad de procesamiento fermentación alcohólica	68
6.2.2.2	Vigilancia tecnológica de la fermentación de biomasa	69
6.2.2.3	Nivel de madurez.....	71
6.2.2.4	Costos de producción total y unitario de electricidad.....	72
6.3	TECNOLOGÍAS TERMOQUÍMICAS	73
6.3.1	PIROLISIS	73
6.3.1.1	Clasificación de los procesos de pirolisis.....	75
6.3.1.2	Procesos	76
6.3.1.2	Capacidad de procesamiento pirolisis.....	77
6.3.1.2	Vigilancia tecnológica de la pirolisis de biomasa.....	79
6.3.1.2	Nivel de madurez.....	81
6.3.1.6	Costo de producción total y unitario de electricidad.....	81
6.3.2	GASIFICACIÓN	83

6.3.2.1	Clasificación	85
6.3.2.2	Capacidad de procesamiento gasificación	86
6.3.2.3	Vigilancia tecnológica de la gasificación de biomasa	87
6.3.2.4	Nivel de madurez.....	89
6.3.2.5	Costo de producción total y unitario de electricidad.....	90
6.3.3	COMBUSTIÓN.....	91
6.3.3.1	Combustión directa	92
6.3.3.2	Capacidad de procesamiento combustión directa	94
6.3.3.3	Vigilancia tecnológica de la combustión directa de biomasa	96
6.3.3.4	Nivel de madurez	98
6.3.3.5	Costo de producción total y unitario de electricidad.....	99
6.3.4	LICUEFACCIÓN.....	100
6.3.4.1	Vigilancia tecnológica de la licuefacción de biomasa	101
6.3.4.2	Capacidad de procesamiento licuefacción	103
6.3.4.3	Nivel de madurez.....	104
6.3.4.4	Costo de producción total y unitario de electricidad.....	105
6.3.5	HIDROTRATAMIENTO	106
6.3.5.1	Vigilancia tecnológica del hidrotratamiento de biomasa	108
6.3.5.1	Capacidad de procesamiento hidrotratamiento.	109
6.3.5.2	Nivel de madurez.....	112
6.3.5.3	Costos de producción total y unitario de electricidad.....	112
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	113
7.1	Nivel de madurez de las tecnologías de transformación de biomasa.	113
7.2	Capacidades de procesamiento de las tecnologías de transformación de biomasa	114
7.3	Costos de producción total y unitario de electricidad de las tecnologías de transformación de biomasa.....	115
8.	CONCLUSIONES.....	117
	Bibliografía.....	119
	Anexo A. Costos producción electricidad a partir de pellets de biomasa.....	127

Anexo B. Costos producción electricidad a partir de biodigestion de biomasa.....	128
Anexo C. Costos producción electricidad a partir de fermentación alcohólica de biomasa. 129	
Anexo D. Costos producción electricidad a partir de pirolisis biomasa.	130
Anexo E. Costos producción electricidad a partir de gasificación biomasa.....	131
Anexo F. Costos producción electricidad a partir de combustión directa de biomasa.	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de la Biomasa según sector productivo.....	20
Figura 2. Generación de biomasa residual.....	22
Figura 3. Procesos de transformación de biomasa residual según su tipo.	23
Figura 4. Procesos para la transformación de biomasa según su contenido de humedad.	24
Figura 5. Procesos de transformación biomasa en energía eléctrica.....	25
Figura 6. Clasificación tecnologías de transformación de biomasa en bioenergía.	40
Figura 7. Pellets producidos a partir de diferentes procesos y materiales	41
Figura 8. Proceso de producción de pellets.	42
Figura 9. Distribución de patentes sobre producción de pellets de biomasa por países.....	45
Figura 10. Variación de patentes sobre producción de pellets de biomasa por año.	45
Figura 11. Simulación de dinámica de fluidos en hornos.	48
Figura 12. Clasificación de biodigestores según su proceso.....	54
Figura 13. Vista transversal de un biodigestor tipo chino.	56
Figura 14. Vista transversal biodigestor hindú.....	56
Figura 15. Biodigestor tipo Taiwán.	57
Figura 16. Biodigestor tipo laguna.....	58
Figura 17. Biodigestor tipo tanque.....	59
Figura 18. Producto derivado de la biodigestion.	61
Figura 19. Distribución de patentes sobre producción de biogás por países.	62
Figura 20. Variación de patentes sobre producción de biogás por años.....	63
Figura 21. Proceso de fermentación del maíz para la obtención de etanol.	66
Figura 22. Distribución de patentes sobre fermentación de biomasa por país.	70
Figura 23. Fermentación de biomasa por año.....	70
Figura 24. Diagrama simplificado proceso de pirolisis.	73
Figura 25. Clasificación de los procesos de pirolisis.	75
Figura 26. Biocombustibles obtenidos a partir de tecnologías termo químicas de transformación de biomasa.	78

Figura 27. Distribución de patentes sobre pirolisis de biomasa por países.....	80
Figura 28. Variación de patentes sobre pirolisis de biomasa por años.	80
Figura 29. Esquema de una planta de gasificación.....	83
Figura 30. Capacidad mundial de la gasificación y crecimiento planificado por producto.	84
Figura 31. Comparación entre diferentes tipos de lechos para gasificación.	85
Figura 32. Distribución de patentes sobre gasificación de biomasa por países. ...	88
Figura 33. Variación de patentes sobre gasificación de biomasa por años.....	89
Figura 34. Planta de biomasa para la generación de energía eléctrica, mediante combustión directa.	93
Figura 35. Distribución de patentes sobre combustión directa de biomasa por países.....	97
Figura 36. Variación de patentes sobre combustión directa de biomasa por años.	98
Figura 37. Procesos en la licuefacción de biomasa.	100
Figura 38. Distribución de patentes sobre licuefacción de biomasa.....	102
Figura 39. Variación de patentes sobre licuefacción de biomasa por años.....	103
Figura 40. Proceso de hidrotratamiento para semillas.	107
Figura 41. Distribución de patentes sobre hidrotratamiento de biomasa por países.	108
Figura 42. Variación de patentes sobre hidrotratamiento de biomasa por años..	108
Figura 43. Esquema proceso de hidrotratamiento de biomasa para combustibles aeronáuticos.....	111
Figura 44. kW por tonelada biomasa vs toneladas biomasa por 100kW.....	114
Figura 45. Costo de producción total y unitario de electricidad de las tecnologías de transformación de biomasa.	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características biomasa en Colombia.	21
Tabla 2. Fuentes tomadas para la determinación de valores de capacidades de producción de las tecnologías de transformación de biomasa.	28
Tabla 3. Fuentes tomadas para la determinación de rendimientos de conversión dependiendo el tipo de biocombustible.	29
Tabla 4. Características entorno del tipo de investigación.	32
Tabla 5. Características desarrollo tecnológico e innovación.	32
Tabla 6. Características aplicación práctica.	33
Tabla 7. Ecuaciones de costos de los insumos.	35
Tabla 8. Ecuaciones de costo de mano de obra.	36
Tabla 9. Ecuaciones de costo de almacenamiento.	36
Tabla 10. Ecuaciones de costos fijos.	37
Tabla 11. Ecuaciones de otros costos.	38
Tabla 12. Ecuaciones del costo total de producción.	39
Tabla 13. Poder calorífico superior para diversas fuentes de biomasa.	43
Tabla 14. Propiedades fisicoquímicas comunes de los pellets y briquetas.	44
Tabla 15. Principales características de los pellets, por su clase.	47
Tabla 16. Eficiencias tecnologías de conversión y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante pellets de biomasa.	48
Tabla 17. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante pelletización de biomasa.	49
Tabla 18. Costos de producción total y unitario de electricidad planta de pellets de biomasa.	50
Tabla 19. Cronología de la evolución del biogás.	52
Tabla 20. Cronología desarrollo del biodigestor.	52
Tabla 21. Composición y rendimiento de producción de biogás de diferentes fuentes de biomasa residual.	53
Tabla 22. Características de los equipos utilizados para la generación de energía eléctrica a partir de biogás.	60

Tabla 23. Eficiencias tecnologías de conversión y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante biodigestion.	62
Tabla 24. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante digestión anaerobia de biomasa.....	64
Tabla 25. Costos de producción total y unitario de electricidad planta de biodigestion de biomasa.....	65
Tabla 26. Características generales de los cultivos utilizados para la obtención de bioetanol.....	67
Tabla 27. Eficiencias tecnologías de conversión y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante fermentación de biomasa.	69
Tabla 28. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante fermentación alcohólica de biomasa.	71
Tabla 29. Costos de producción total y unitario de electricidad planta de fermentación alcohólica de biomasa.	72
Tabla 30. Distintos procesos de pirolisis.	77
Tabla 31. Especificaciones planta pirolisis de biomasa.....	77
Tabla 32. Eficiencias tecnologías de conversión y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante pirolisis.....	79
Tabla 33. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante pirolisis.	81
Tabla 34. Costos de producción total y unitario de electricidad planta de pirolisis biomasa.....	82
Tabla 35. Especificaciones planta gasificación de biomasa.....	86
Tabla 36. Eficiencias tecnologías de conversión y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante gasificación.....	87
Tabla 37. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante gasificación.....	89
Tabla 38. Costos de producción total y unitario de electricidad planta de gasificación biomasa.	90
Tabla 39. Tecnologías de combustión directa.	94
Tabla 40. Capacidades tecnologías de combustión de biomasa.....	95

Tabla 41. Especificaciones planta combustión directa de biomasa.....	95
Tabla 42. Eficiencia planta térmica de carbón y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante combustión directa.	96
Tabla 43. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante combustión directa de biomasa.....	98
Tabla 44. Costos de producción total y unitario de electricidad planta combustión directa de biomasa.	99
Tabla 45. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante licuefacción.....	104
Tabla 46. Países productores de grasas y aceites (en miles de toneladas).....	109
Tabla 47. Plantas productoras de biocombustibles por hidrotratamiento.	110
Tabla 48. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante hidrotratamiento.	112
Tabla 49. Nivel de madurez de las tecnologías estudiadas.	113
Tabla 50. Nivel de madurez de las tecnologías estudiadas.	113

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Frente a la problemática actual de crisis energética y calentamiento global que afronta el mundo, diferentes organizaciones que agrupan diversos países han enfocado parte de sus esfuerzos en la mitigación de dichas problemáticas; en el centro de este debate se encuentra el uso indiscriminado de combustibles fósiles y la alta producción de gases de efecto invernadero, que son expulsadas a la atmosfera. Es por esto que 190 naciones, han impulsado el COP 21, acuerdo que busca como principal objetivo evitar que la temperatura media del planeta aumente más de 2°C, con respecto a las temperaturas preindustriales, al disminuir paulatinamente las emisiones de 6 gases de efecto invernadero: dióxido de carbono CO_2 , metano CH_4 , óxido nitroso N_2O , Hidrofluorocarbonos HFC, Perfluorocarbonos PFC, Hexafluoruro de azufre SF_6 ; en los países industrializados y adscritos al mismo, en el cual Colombia está anexado (MINAMBIENTE 2015).

Ya que la generación de energía eléctrica en muchos lugares del mundo se basa en materias de origen fósil, hacen de esta industria una de las grandes contaminantes del ecosistema planetario en lo que respecta gases de efecto invernadero, por ello muchas organizaciones y países, han buscado en las últimas décadas fuentes alternativas para la generación de energía eléctrica, que sean responsables con el medio ambiente y que sean viables en la producción de energía a pequeña, mediana y gran escala.

La biomasa residual clasifica como una de las fuentes alternativas de energía, y ha sido utilizada por la humanidad como fuente tradicional de energía, especialmente en países en vía de desarrollo, que la utilizan habitualmente en forma de leña para labores de cocción e iluminación; también es tenida en cuenta entre las fuentes alternativas para la producción de energía eléctrica, la cual para el año 2013 generó 405TWh de electricidad a nivel mundial (REN21, 2014), donde Estados Unidos, Alemania y Finlandia encabezan la lista de productores de energía a base de biomasa; entre tanto en América del sur se destaca el desarrollo de Brasil en la producción de energía eléctrica a partir de esta fuente,

que genera cerca del 8.1% de la energía eléctrica consumida en dicho país, que se sustenta básicamente en la generación de etanol (*ibíd.*).

En Colombia se calcula que para el año 2015, la biomasa residual aportó en materia de energía eléctrica cerca de 804GWh, que corresponde al 1.3% de la generación total para este año, donde se destaca el alto uso del bagazo de caña de azúcar, además de carbón vegetal y otros residuos como los de la palma de aceite y el arroz. Por otra parte, los biocombustibles participaron del 7.04% del consumo final de energía en sector del transporte para este mismo año (UPME, 2015). También se calculó que el potencial para desarrollar cultivos energéticos más allá de la porción de aquellos existentes en el caso de la palma de aceite y la caña de azúcar que son utilizados para la producción de biocombustibles, es igualmente considerable en tanto que se visualiza la disponibilidad de tierras con vocación agrícola, teniéndose cerca de 15 millones de hectáreas con tal vocación que hoy en día no son destinadas a esa actividad productiva (Perfetti,2013); con este potencial también se espera que con el adecuado manejo de la biomasa residual del campo y la energía eléctrica que puede proveer, sirva para enfrentar las necesidades y oportunidades que tiene el sector rural colombiano en estos momentos, así como también generar un desarrollo y modernización del sector agropecuario nacional.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, está llamada a realizar investigaciones en el campo de las fuentes de energía alternativas en pro del desarrollo del país, es en esta área donde se evidencia una excelente oportunidad para aportarle a la sociedad colombiana y en particular a la comunidad universitaria de la Facultad Tecnológica, donde investigaciones acerca del estado del arte de las tecnologías de transformación de biomasa residual en energía eléctrica, pueden ampliar las referencias actuales y antecedentes, para que en un futuro sirvan de base para el desarrollo de proyectos productivos en torno al tema, y para la consulta bibliográfica de la comunidad en general.

1.1 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

Debido a la actual situación energética de Colombia, el estado ha empezado a promover de manera directa el uso de energías renovables para la generación de energía eléctrica a lo largo del país, especialmente en las zonas no interconectadas (ZNI), pero dentro de las limitantes que se han detectado para la correcta implementación de las tecnologías con las cuales se puede aprovechar energéticamente la biomasa en Colombia, se encuentra desconocimiento y escaso aprovechamiento de los potenciales de recursos energéticos de las áreas rurales, especialmente, de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) (PERS, 2015).

Este desconocimiento acerca del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, permite que gran parte de la energía en forma de biomasa residual del país no sea aprovechada de la mejor manera, lo que contribuye a que zonas apartadas (donde se encuentra generalmente la biomasa), cuenten con bajos índices de desarrollo, además de que la carga de generación de energía se vea recaída en el sector fósil o hidroeléctrico.

2. JUSTIFICACIÓN.

Debido a la actual crisis ecológica y energética que atraviesa el mundo, el estado Colombiano aúna esfuerzos para mitigar y prever los diferentes escenarios energéticos futuros; por ello mediante la ley 1715 de 2014, incentiva el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, y su participación en zonas no interconectadas a nivel nacional, además de establecer el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía (Congreso de la república de Colombia, 2014). Es por ello que academia está llamada a realizar un aporte a la solución de la problemática, mediante la contribución de documentación técnica, teórica y metodológica acerca del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía que abundan en el país, para con ello contribuir al desarrollo social y económico, especialmente del sector rural Colombiano, y favorecer el mejoramiento de la calidad de vida y el crecimiento del sector agroindustrial.

En base a lo anterior, se justifica el desarrollo de esta investigación, que busca determinar del nivel de madurez y la capacidad de las tecnologías existentes para la transformación de biomasa residual en energía eléctrica, estudio que no se ha adelantado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, y que se identifica como una excelente oportunidad para contribuir con la investigación y el desarrollo del aprovechamiento de la biomasa residual en el país, además de servir como referente académico para futuras investigaciones que se desarrollen al respecto del tema.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el nivel de madurez y las capacidades de las tecnologías existentes para la transformación de biomasa residual en energía eléctrica.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer el nivel de madurez tecnológico de las tecnologías existentes para la transformación de biomasa residual en energía eléctrica.
- Determinar las capacidades de generación de energía eléctrica a partir de la biomasa residual en las tecnologías de transformación consideradas.
- Estimar los costos de producción total y unitario de las tecnologías de transformación de biomasa residual, que se encuentren a nivel comercial, para la generación de electricidad en Colombia.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1 BIOMASA

La biomasa es un recurso natural, abundante en la biosfera terrestre, susceptible de ser aprovechada energéticamente y que ha sido utilizada como fuente de energía por el hombre desde el descubrimiento del fuego hasta hoy día; Según la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588, la biomasa es todo material de origen biológico, excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas, sufriendo un proceso de mineralización. Por lo tanto la biomasa incluye, entre otras, la materia orgánica de origen vegetal y los materiales que proceden de su transformación natural o artificial, como los residuos procedentes de las actividades agrícolas y forestales, así como los subproductos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera. (CEN, 2003).

4.1.1 Clasificación biomasa

La biomasa abarca una gran variedad de formas y presentaciones que se producen de manera natural, gracias a la fotosíntesis y a los procesos derivados de la cadena alimenticia; por lo tanto la misma se genera de un sinnúmero de fuentes, muchas de las cuales son de fácil acceso o control para el ser humano, que las utiliza de diferentes maneras; pero más específicamente los tipos de biomasa que se pueden considerar para la obtención de energía son (Fernández, 2008):

Biomasa Natural

Es aquella que se genera en la naturaleza sin la necesidad de intervención humana; sin embargo, este tipo de biomasa no es la más adecuada para su aprovechamiento energético masivo ya que ello podría conllevar la destrucción de los ecosistemas que la producen, y que constituyen una reserva de un valor incalculable (Fernández, Energía de la biomasa, 2011).

Biomasa residual

La biomasa residual es aquella materia orgánica que se genera como consecuencia de cualquier proceso en el que se consume biomasa, se produce en

explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas, así como los residuos de origen orgánico generados en las industrias y en los núcleos urbanos. (CIEMAT, 2008).

Cultivos energéticos

Los cultivos energéticos, realizados con la finalidad de producir biomasa transformable en biocombustibles (en lugar de producir alimentos, como ha sido la actividad tradicional de la agricultura) son ya realidad en países como Brasil y Estados Unidos, que enfocan la producción de caña de azúcar y maíz, respectivamente, a la obtención de bioetanol.

4.1.2 Clasificación de la biomasa residual por sector productivo

La clasificación de la biomasa residual que se tomará en cuenta para el presente trabajo, se basa en la clasificación que hace las UPME en el Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, la clasificación establecida es de 5 sectores productivos:

Sector agrícola

La agricultura es una actividad antropogénica que genera cantidades considerables de biomasa residual, que gestionada de una manera óptima está en la capacidad de generar cantidades considerables de combustibles, la biomasa de este sector se divide en: residuos forestales y cultivos energéticos.

Sector silvícola o cultivos forestales

Las astillas, las cortezas o el serrín de las industrias de primera y segunda transformación de la madera y los huesos, cáscaras y otros residuos de la industria agroalimentaria (aceite de oliva, conservera, frutos secos...) son parte de los biocombustibles sólidos industriales, que se obtienen de esta franja de la producción forestal (IDAE, 2007)

Sector cultivos energéticos

Esta biomasa corresponde a los residuos producidos por plantas de crecimiento rápido y poco mantenimiento, las cuales normalmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo, como son: la palma de aceite, el girasol, la soya, la

higuerilla, la jatropha, el maní, la caña de azúcar, el maíz, el sorgo, la remolacha, la yuca, el trigo, y plantas acuáticas, como el Jacinto de agua y ciertas algas. (UPME, 2010).

Sector pecuario

Este tipo de biomasa está relacionada con los diferentes residuos de los animales, su poder energético es obtenido por medio de la conversión indirecta del proceso fotosintético, es decir por la ingesta de semillas, plantas o vegetales. Los residuos resultantes de este sector provienen bien sea de animales vivos y sus procesos primarios, es decir su estiércol, o de animales muertos y su proceso industrial representado en piel, pezuñas y huesos (Ramírez, 2017)

Sector de residuos sólidos urbanos

Los centros urbanos generan los denominados residuos sólidos urbanos (RSU) que provienen de diferentes actividades y están constituidos por cantidades considerables de residuos como: papel, madera, carbón vegetal, alimentos, aguas negras y residuos vegetales provenientes de la poda de zonas verdes, los cuales constituyen su fracción orgánica. Cuando esta fracción orgánica se descompone, los residuos generan compuestos volátiles como el metano y el dióxido de carbono, que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Por su composición fisicoquímica se considera que los RSU poseen un considerable valor energético. (UPME, 2010).

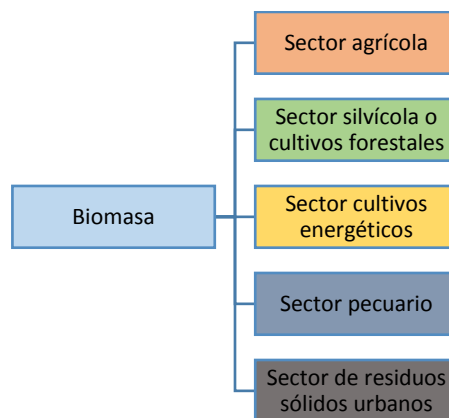


Figura 1. Clasificación de la Biomasa según sector productivo.

Fuente: Elaboración propia a partir de (UPME, op. cit. p. 30.)

La Figura 1 muestra la clasificación de la biomasa residual en 5 sectores, el agrícola, silvícola o cultivos forestales, cultivos energéticos, pecuario y residuos sólidos urbanos.

Tabla 1. Características biomasa en Colombia.

sector generador de biomasa		Características físicas	Cantidad de residuo [t/año]	Potencial energético [TJ/año]	
Sector agrícola	Residuos forestales	de aserrio	Polvo, sólido, HR>50%	-	-
		de ebanistería	Polvo sólido, HR 30-45%	-	-
		de plantaciones	sólido, HR>55%	-	-
	Otros	Arroz	Sólido seco	6.282.407	27.835,94
		Banano	Sólido húmedo	11.550.891	6.595,93
		Café	Sólido seco	5.051.248	49.106,89
		Caña de azúcar	Sólido húmedo o seco	15.534.591	118.578,88
		Caña de panela	Sólido húmedo o seco	9.513.430	81.054,57
		Maíz	Sólido húmedo	1.936.479	20.795,80
Sector pecuario	estiércol	Palma de aceite	Sólido húmedo	1.660.074	16.013,65
		Plátano	Sólido húmedo	20.414.043	11.657,07
		Avícola	Sólido muy húmedo	3.446.348	29.183,10
Sector residuos sólidos urbanos		Bovino	Sólido muy húmedo	99.168.608	84.256,34
		Porcino	Sólido muy húmedo	2.803.110	4.308,46
		Plazas de mercado y centros de abasto (12 ciudades principales)	Sólido muy húmedo	120.210	91,92
		Poda	Sólido húmedo o seco	44.811	318,13
Total			177.526.250	449.796,68	

Fuente:(Elaboración propia a partir de UPME, 2010)

En la Tabla 1 se relacionan datos de algunas de las características físicas, cantidades de residuos producidos, y el potencial energético de los residuos más representativos de los sectores agrícola, pecuario y de residuos sólidos urbanos, generadores de biomasa residual en Colombia según la UPME

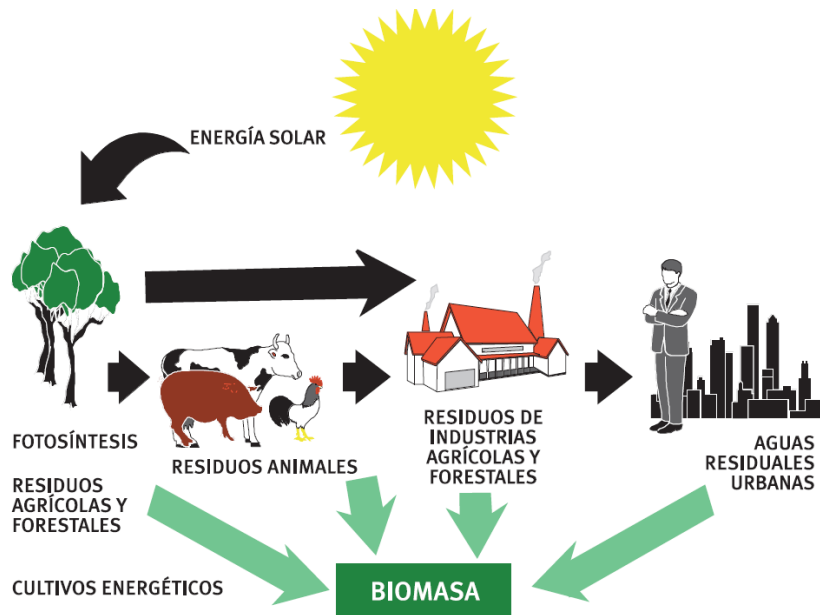


Figura 2. Generación de biomasa residual.

Fuente: (IDAE, 2007)

Como se observa, la biomasa tiene un sin número de posibles fuentes tanto naturales, como las provenientes de los procesos de obtención de diversas materias primas y productos de consumo masivo; los principales generadores de biomasa se muestran en la *Figura 2*.

4.1.3 Transformación energética de la biomasa

La biomasa residual es una abundante materia prima para la generación de calor y/o electricidad, además de ser la única fuente de energía renovable que es susceptible de ser transformada por diferentes procesos, en biocombustibles, que pueden ser: sólidos, gaseosos y líquidos; para hacer posible la obtención de tan variados biocombustibles, es necesario tener en cuenta aspectos como el origen de la biomasa, los estados físicos y químicos que los caracterizan, para así determinar los procesos de transformación más viables para cada caso particular; en la *Figura 3* se relacionan los procesos típicos de transformación energética para ciertos grupos de biomazas residuales:

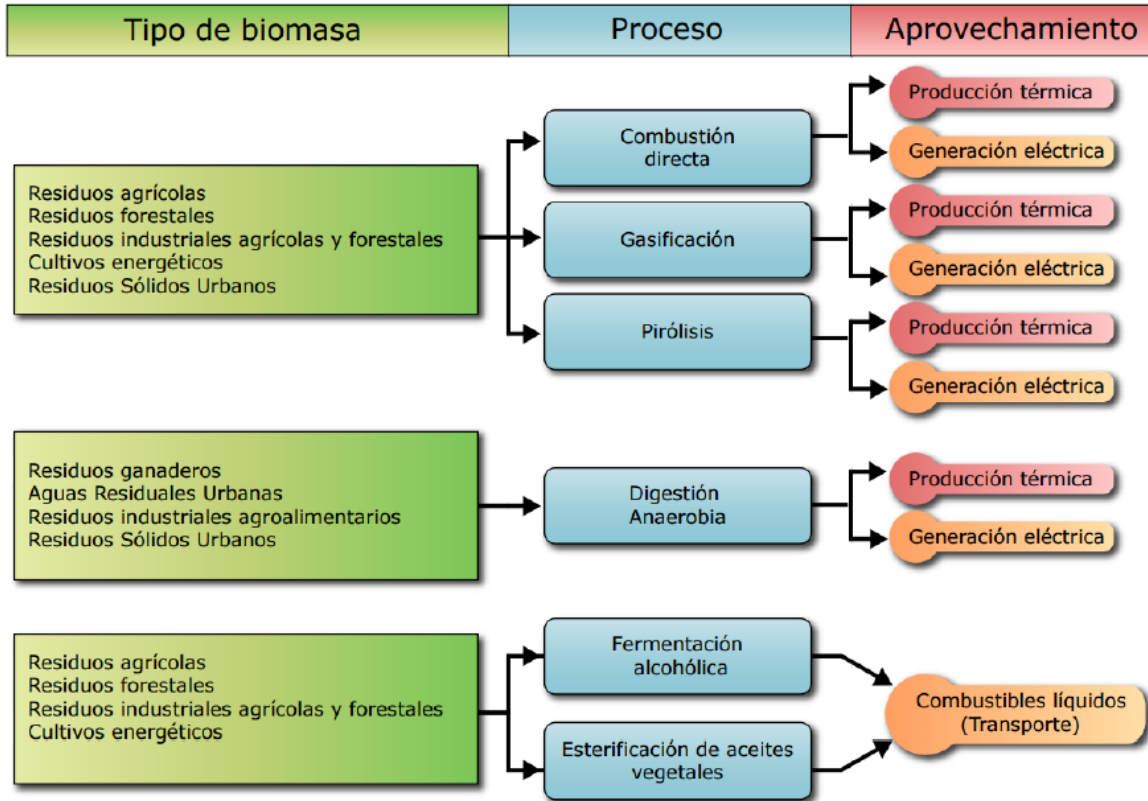


Figura 3. Procesos de transformación de biomasa residual según su tipo.

Fuente: (Eduambiental, 2015)

Una manera ampliamente aceptada de clasificar la biomasa residual, es la de catalogarla por su contenido de humedad, ya que esta característica es determinante en la selección de la tecnología más apta para su transformación energética, si la biomasa es seca ($HR < 50\%$) o húmeda ($HR > 75\%$), los procesos más adecuados se distribuirán en una serie de tecnologías que proveen diferentes tipos de combustibles y productos residuales, la *Figura 4* resume los procesos más adecuados para la transformación de biomasa según su contenido de humedad.

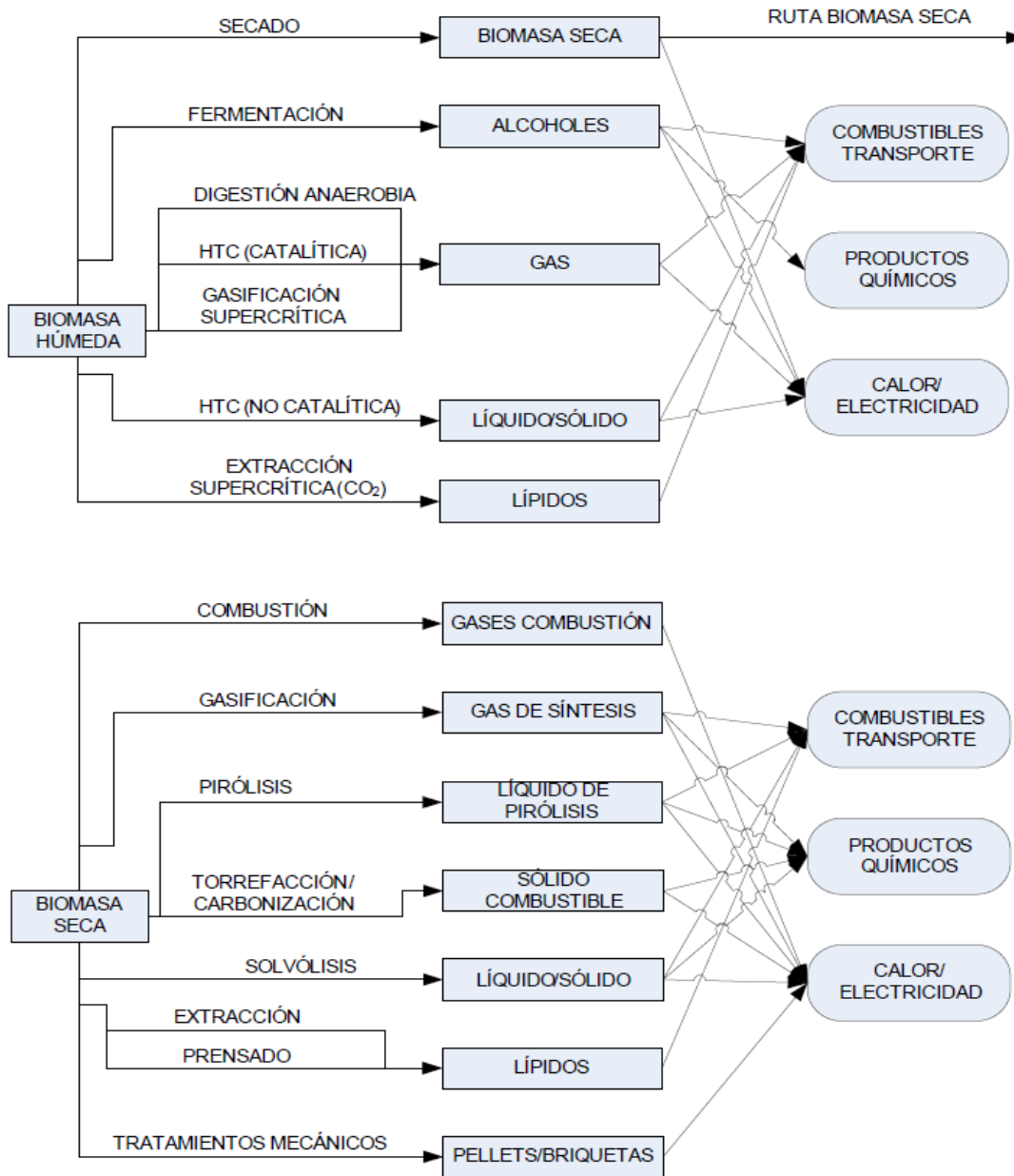


Figura 4. Procesos para la transformación de biomasa según su contenido de humedad.

Fuente: (J. Arauzo, 2014)

4.1.4 Proceso de transformación de un biocombustible en energía eléctrica

El proceso de transformación de la biomasa residual en energía eléctrica conlleva al menos, dos procesos de transformación, el primero consiste en transformar la biomasa residual en un biocombustible (que puede ser sólido, líquido o gaseoso), y el segundo, en transformar el biocombustible en energía eléctrica, tal como se muestra en la Figura 5

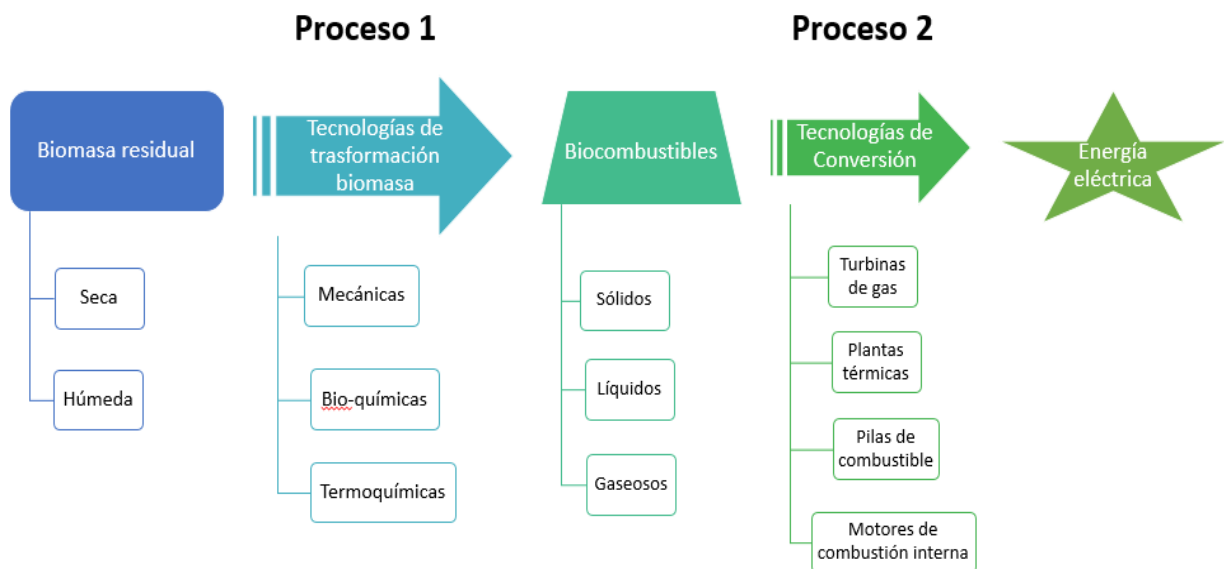


Figura 5. Procesos de transformación biomasa en energía eléctrica.

Fuente: Elaboración propia

5. METODOLOGÍA

Para poder determinar: la capacidad de procesamiento, el nivel de madurez, los costos de producción total y unitario de electricidad a partir de la biomasa residual, se sigue la siguiente metodología:

Primero, se hace una clasificación de las tecnologías de transformación de la biomasa residual en energía eléctrica, en ella se determinan las principales generalidades como: tipo de biomasa a procesar, tipo de productos a obtener, (biocombustibles) y características de procesamiento.

Segundo, se determinan las eficiencias de conversión de estas tecnologías, a partir de información secundaria.

Tercero, se determinan las capacidades máximas de procesamiento actuales a nivel mundial, de las tecnologías de transformación de biomasa, expresadas en kW por tonelada de biomasa residual procesada, también a partir de información secundaria o mediante cálculos, para los casos donde no hay publicaciones al respecto.

Cuarto, se realiza un proceso de vigilancia tecnológica, donde se determina el número de patentes de las tecnologías abordadas, durante los últimos 10 años, información necesaria para la determinación posterior del nivel de madurez en cada tecnología estudiada.

Quinto, se establece el nivel de madurez de cada tecnología, utilizando el método de Niveles de Desarrollo Tecnológico TRL por sus siglas en inglés, (*Technology readiness level*), desarrollado en la NASA y empleado por la Unión Europea.

Sexto, se determinan los costos de producción total y unitario de electricidad, para cada una de las tecnologías consideradas.

5.1.1 Clasificación de las tecnologías de transformación

La elaboración de este apartado se realiza a partir de la información contenida en la revisión de cerca de 50 publicaciones, (artículos, informes técnicos de origen privado y gubernamental), durante los últimos años; adicionalmente se consideran datos de los tipos de biomasa que se procesan con cada tecnología, los productos

derivados de la conversión (biocombustibles) y las principales generalidades de los mismos.

5.1.2 Eficiencias de conversión

Para determinar las eficiencias de conversión, en cada tecnología, se revisan publicaciones desde el año 2010; se usan tres fuentes de información: la primera corresponde a la base de datos del Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos de la Universidad de Zaragoza, la segunda a la Guía de valorización energética de residuos, elaborada por el IDAE del gobierno español, y la tercera a los valores de eficiencias utilizados por el autor N. El Bassam en el manual: *Handbook of bioenergy crops*.

5.1.3 Determinación de las capacidades máximas de procesamiento en cada tecnología

Primero, se determinan las capacidades de producción de biocombustible a partir de biomasa residual (proceso 1, de la Figura 5), en kW por tonelada, de las tecnologías que se encuentran a nivel comercial (gasificación, pirolisis, combustión directa, pelletización, biodigestión y fermentación). Las cuatro primeras tecnologías cuentan esta información, mientras las dos últimas se calculan.

Segundo, se escoge el biocombustible más apropiado para adoptarlo en cada una de las tecnologías consideradas, y se emplean los rendimientos de conversión típicos para realizar los cálculos de las capacidades máximas, (proceso 2, de la Figura 5); esto con el fin de cuantificar las capacidades de procesamiento máximas, y facilitar el proceso de comparación entre las distintas tecnologías.

Tercero, se escoge un valor de potencia eléctrica de referencia, (100 kW), para determinar la cantidad de biomasa requerida para generar esta potencia, y se comparan las capacidades de procesamiento de biomasa, en toneladas, para cada una de las tecnologías estudiadas.

Cuarto se determinan las capacidades máximas de procesamiento de cada tecnología, en KW por tonelada de biomasa residual. (KW/t)

5.1.3.1 Capacidades de producción de las tecnologías de transformación de biomasa en biocombustibles

Como se ha mencionado previamente, se usan dos métodos para calcular las capacidades de producción en cada tecnología estudiada.

En el primer método, se hace una revisión bibliográfica, (ver Tabla 2) y se consultan los valores de capacidades de producción, (unidades de volumen o peso de biocombustible por tonelada de biomasa residual), de las siguientes tecnologías: mecánica (pelletización) y termoquímica (pirólisis, gasificación, y combustión directa), para la producción de biocombustibles (pellets, aceite pirólisis, gas de síntesis, biocarbon, respectivamente.)

Tabla 2. Fuentes tomadas para la determinación de valores de capacidades de producción de las tecnologías de transformación de biomasa.

Tecnología	Fuente	Año	Título
Mecánica	IEA	2010	World Energy Outlook 2011
Pirólisis	Kingtiger Group	2018	Waste Tyre Pyrolysis Plant Manufacturer - KT Group
Gasificación	FAO	2014	Bioenergía y seguridad alimentaria evaluación rápida
Combustión directa	Sanguino Barajas, Téllez Anaya, Escalante Hernández , & Vasquez Cardozo	2010	Aprovechamiento energetico de la biomasa residual del sector agricola

Fuente: Elaboración propia a partir de (IEA, 2010) (Kingtiger Group, 2018) (FAO, 2014) (Sanguino Barajas, Téllez Anaya, Escalante Hernández , & Vasquez Cardozo , 2010)

En el segundo método, se estiman las capacidades de producción en aquellas tecnologías donde no fue posible obtener información bibliográfica; para lo cual se multiplica el potencial energético del biocombustible por los rendimientos de producción, este procedimiento se realiza para las tecnologías de biodigestión y fermentación, considerando un rendimiento de producción promedio típico del biogás y el bioetanol, ya que estos valores varían dependiendo del tipo y características de la biomasa utilizada.

5.1.3.2 Selección de biocombustible y rendimiento de conversión en cada tecnología

Para la selección del biocombustible más representativo producido por cada tecnología de transformación de biomasa, se hizo una investigación acerca de los biocombustibles producidos por cada tecnología, en este apartado se debe acotar que los productos de las diferentes tecnologías de transformación no son únicamente los biocombustibles estudiados en esta investigación sino que además se producen una serie de subproductos los cuales no son tomados en cuenta como biocombustibles, esto con el fin facilitar los cálculos.

Para precisar los rendimientos de conversión se hizo una revisión bibliográfica acerca de los rendimientos de las tecnologías de conversión de los diferentes biocombustibles, en la Tabla 3 se muestran las fuentes principales de información consultadas, además del tipo de biocombustible estudiado.

Tabla 3. Fuentes tomadas para la determinación de rendimientos de conversión dependiendo el tipo de biocombustible.

Tipo Biocombustible	Fuente	Año	Título
Biogás	FAO	2014	Manejo del estiércol
Bioetanol	Comunidad de Madrid	2010	Guía de Valorización energética de residuos
Pellet	Comunidad de Madrid	2010	Guía de Valorización energética de residuos
Aceite pirólisis	Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos	2014	La microgeneración con biomasa
Syngas, LCV-gas	FAO	2014	Bioenergía y seguridad alimentaria evaluación rápida
Biocarbon	Comunidad de Madrid	2010	Guía de Valorización energética de residuos

Fuente: Elaboración propia a partir de (Comunidad de Madrid, 2010) (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos, 2014) (FAO, 2014)

5.1.3.3 Potencia eléctrica de referencia

El valor de potencia eléctrica de referencia escogido fue de 100KW, este valor se toma para poder realizar una comparación de la capacidad de procesamiento, entre las tecnologías de transformación de biomasa en energía eléctrica, además

fue un valor de referencia tomado en el apartado de los costos de producción total y unitario de electricidad, ya que para estos cálculos se tomaron valores de potencias de referencia de 10, 40, 100 KW.

5.1.3.4 Capacidades de procesamiento

Para determinar las capacidades de procesamiento de cada tecnología se calcula el potencial de la biomasa (KW/t), esto se hace dividiendo la potencia eléctrica (100KW), por el producto de la biomasa residual requerida y los respectivos rendimientos de conversión definidos previamente. (Proceso 2, Figura 5).

5.1.4 Vigilancia tecnológica

El proceso de vigilancia tecnológica incluye una búsqueda de patentes en cada tecnología, incluidos año de publicación e institución solicitante, en el periodo (2008 hasta 2016), estos datos fueron consultados en el portal Patentscope, de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI), que proporciona acceso a las patentes otorgadas por el Tratado de Cooperación en materia de Patentes (Patent Cooperation Treaty: PCT) y a la Oficina Europea de Patentes (EPO), a partir de los datos obtenidos se determinan las regiones geográficas (o países), de mayor desarrollo a nivel mundial; adicionalmente se hace una primera aproximación del nivel de desarrollo de cada tecnología dependiendo del número de patentes encontradas, además de estudiar la tendencia de generación de patentes desde el año 2008 a 2016.

5.1.5 Determinación del nivel de madurez

Para establecer el nivel de madurez de cada tecnología abordada, se utiliza la metodología TRL (*Technology Readiness Levels*), referenciada en el documento *Horizon 2020* de la Unión Europea, para proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i); esta metodología es de amplia aceptación a nivel mundial, y mide el nivel de madurez de una tecnología, en una escala, desde el TRL 1, la tecnología de menor nivel, hasta el TRL 9, la de mayor nivel.

La metodología TRL, también sirve para identificar la correspondencia de las actividades de I+D+i, con las diferentes etapas del desarrollo tecnológico, y, como todo modelo, corresponde a una simplificación práctica de la realidad, por lo que debe interpretarse de acuerdo al contexto. En el caso del presente trabajo, se establece el de nivel de madurez con base en **tres criterios** de evaluación que se encuentran contemplados en la metodología TRL, los cuales son: **entorno del tipo de investigación, desarrollo tecnológico e innovación y aplicación práctica**; a cada uno de ellos, se le asignó un valor numérico entre 1 y 9, correspondiente a la clasificación por niveles contemplados en la metodología TRL, los parámetros de los criterios utilizados se listan continuación:

Niveles TRL según criterio: entorno del tipo de investigación.

- TRL 1: Principios básicos observados y reportados.
- TRL 2: Concepto y/o aplicación tecnológica formulada.
- TRL 3: Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica.
- TRL 4: Validación de componente y/o disposición de los mismos en entorno de laboratorio.
- TRL 5: Validación de componente y/o disposición de los mismos en un entorno relevante.
- TRL 6: Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante
- TRL 7: Demostración de sistema o prototipo en un entorno real.
- TRL 8: Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones.
- TRL 9: Sistema probado con éxito en entorno real

En la Tabla 4 se muestra la valoración de los niveles del entorno del tipo de investigación, agrupados en tres entornos: real, de simulación y de laboratorio.

Tabla 4. Características entorno del tipo de investigación.

Nivel	Descripción
TRL 9	Entorno real
TRL 8	
TRL 7	
TRL 6	Entorno de simulación
TRL 5	
TRL 4	Entorno de laboratorio
TRL 3	
TRL 2	
TRL 1	

Fuente: (Unión Europea, 2014)

Niveles TRL según criterio: desarrollo tecnológico e innovación.

- TRL 1: Investigación básica.
- TRL 2: Formulación de la tecnología.
- TRL 3: Investigación aplicada. Prueba de concepto.
- TRL 4: Desarrollo a pequeña escala (laboratorio).
- TRL 5: Desarrollo a escala real.
- TRL 6: Sistema/prototipo validado en entorno simulado.
- TRL 7: Sistema/prototipo validado en entorno real.
- TRL 8: Primer sistema/prototipo comercial.
- TRL 9: Aplicación comercial.

En la Tabla 5 se muestra la valoración del *desarrollo tecnológico e innovación*, agrupados en tres desarrollos: innovación, desarrollo e investigación.

Tabla 5. Características desarrollo tecnológico e innovación.

Nivel	Descripción
TRL 9	Innovación
TRL 8	
TRL 7	
TRL 6	Desarrollo
TRL 5	
TRL 4	Investigación
TRL 3	
TRL 2	
TRL 1	

Fuente: (ídem)

Niveles TRL según criterio: aplicación práctica.

- TRL 1: Investigación básica.
- TRL2 – TRL 4: Concepto tecnológico. Prueba de concepto. Validación en laboratorio.
- TRL 5: Validación en entorno relevante.
- TRL 6: Demostración en entorno relevante.
- TRL 7: Demostración en entorno operacional (real).
- TRL 8: Sistema completo y certificado.
- TRL 9: Despliegue.

En la Tabla 6 se muestra la valoración según la aplicación práctica, agrupados en tres aplicaciones: despliegue, producto/servicio comerciable o certificaciones pruebas específicas, prototipo/demostrador desarrollo tecnológico y prueba de concepto investigación industrial.

Tabla 6. Características aplicación práctica.

Nivel	Descripción
TRL 9	Despliegue
TRL 8	Producto o servicio comerciable Certificaciones pruebas específicas
TRL 7	Prototipo/Demostrador Desarrollo tecnológico
TRL 6	
TRL 5	
TRL 4	
TRL 3	Prueba de concepto Investigación industrial
TRL 2	
TRL 1	

Fuente: (idem)

Para evaluar el nivel de madurez de cada tecnología, se hace una síntesis de los datos obtenidos en la vigilancia tecnológica y en la revisión bibliográfica; se asigna una valoración a cada uno de los tres criterios, y se toma como nivel de madurez de la respectiva tecnología estudiada, el menor valor de los tres asignados.

5.1.6 Costo de producción total y unitario de electricidad

Para la determinar los costos de producción de las tecnologías, se establece como referencia los parámetros establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (FAO, op.cit.) en su informe “Bioenergía y seguridad alimentaria. Evaluación rápida”, en donde se contemplan todos los pormenores de los costos asociados a plantas de generación eléctrica a partir de biomasa residual; el análisis hecho estima el costo en dólares para plantas con capacidades de 10, 40 y 100 KW, respectivamente

5.1.6.1 Costos de operación

Los costos de operación consisten en los costos asociados a insumos, costo de mano de obra calificada y no calificada, costo del transporte de la materia prima (biomasa), desde el punto de recolección hasta la planta y el costo por el almacenamiento. Estos costos indirectos son considerados para un periodo de un año.

Cálculo de costo de los insumos requeridos

Los insumos requeridos consisten en el costo de la materia prima (biomasa), y el costo del diésel para el arranque. Las ecuaciones utilizadas para llevar a cabo los cálculos de los costos para estos ítems se presentan en la Tabla 7

Tabla 7. Ecuaciones de costos de los insumos.

Ítem	Ecuación y Supuesto	Observación
Cantidad de materia prima	$QF = PG/[PC \times \text{eficiencia del motor a gas} \times (1 - \text{Pérdidas de la potencia debido a la operación})]$ Dónde: QF es la cantidad de materia prima (tonelada por año) PG es la generación de potencia (kWh por año) PC es la conversión de potencia (kWh por kg de materia prima)	PC varía con respecto al tipo de materia prima Se asume una pérdida de potencia debida a operación de 15%
Consumo de agua	$WC = PG/WS$ Dónde: WC es el agua consumida (m ³ por año) PG es la generación de potencia (kWh por año) WS es consume de agua especifica (kWh por m ³)	Valor por defecto de WS es 10,872.73 kWh por m ³ (Arena et al., 2010a)
Consumo de Diésel para el arranque (100% sistemas de gas de síntesis)	$DC = 10\% \times PC \times OP/DS$ Dónde: DC es el consume de Diésel (litros por año) PC es la capacidad de generación de potencia (kW) OP son las horas operadas durante el periodo de arranque (horas por año) DS es el consumo especifico de diésel (kWh por litro)	PC son 10kW, 40kW y 100kW capacidad Valor por defecto de OP es 365 horas por año (1 hora por día) Valor por defecto DS es 3.33.
Costos totales de insumos	$TIC = (QF \times Cf) + (WM \times Cw) + (DC \times Cd)$ Donde: TIC es el costo total de insumos (USD por año) QF es la cantidad de materia prima (tonelada por año) WM es el agua de reposición (m ³ por año) DC es el consumo de diésel (litros por año) Cf es el costo unitario de la materia prima (USD por tonelada) Cw es el costo unitario del agua (USD por m ³) Cd es el costo unitario del diésel (USD por litro)	Costo del oxígeno como agente gasificador y del vapor no son considerados en esta herramienta.
Generación de energía (PG) (kWh por año)	Capacidad de potencia (kW) x Horas de operación por año Dónde, Horas de operación por año = Horas de operación por día x 365 días por año	Horas de operación por año ingresado por el usuario.

Fuente: (FAO, op. cit.)

Cálculo del costo de la mano de obra requerida

Este paso presenta las ecuaciones y suposiciones para calcular los costos de mano de obra y misceláneos con base en la capacidad de generación de potencia como lo muestra la Tabla 8.

Tabla 8. Ecuaciones de costo de mano de obra.

Ítem	Ecuación y Supuesto	Observación
Número de empleados no calificados	Para capacidad de 10kW 1 persona Para capacidad de 40kW 3 personas Para capacidad de 100kW 6 personas	(Nouni et al., 2007) (Dasappa, Subbukrishna, Suresh, Paul, & Prabhu, 2011)
Número de empleados calificados	Para capacidad de 10kW 1 persona Para capacidad de 40kW 1 persona Para capacidad de 100kW 2 personas	(Dasappa et al., 2011)
Costo total de mano de obra no calificada (USD por año)	Costo unitario de mano de obra no calificada x número de empleados no calificados x horas de operación por año	Costo unitario de mano de obra no calificada (USD/persona/hora) Ingresada por el usuario en "Datos de insumos requeridos" Horas de operación por año igual que en la Tabla 3.
Costo de mano de obra calificada (USD por año)	Costo unitario de mano de obra calificada x número de empleados calificados x horas de operación por año	Costo unitario de mano de obra calificada (USD/persona/hora) Ingresada por el usuario en "Datos de insumos requeridos" Horas de operación por año igual que en la Tabla 3.
Costos misceláneos (USD por año)	Porcentaje de costos misceláneos (%) x (Costo total de mano de obra no calificada + Costo total de mano de obra calificada)	Porcentaje de costos misceláneos ingresado por el usuario. Valor por defecto 10%
Costo de mano de obra total (USD por año)	Costo total de mano de obra no calificada + Costo total de mano de obra calificada + Costos misceláneos	

Fuente: (idem)

Cálculo de costo de almacenamiento

En la Tabla 9 se presentan las ecuaciones de cálculo para estimar los costos de almacenamiento.

Tabla 9. Ecuaciones de costo de almacenamiento.

Ítem	Ecuación y Supuesto	Observación
Capacidad de almacenamiento (t/año)	La capacidad de almacenamiento instalada en la hoja "Calculadora de almacenamiento" presionando en "Calculadora almacenamiento"	
Costo de almacenamiento (USD por año)	Costo de almacenamiento unitario x Capacidad de almacenamiento	Costo de almacenamiento unitario (USD/t/día) ingresado por el usuario con la guía proporcionada en el manual.

Fuente: (idem)

5.1.6.2 Cálculo de costos fijos

Los costos fijos consisten en los costos asociados a equipos, construcción, instalación y red de distribución; los costos de los equipos se determinaron mediante una búsqueda bibliográfica (GAIA, 2016) (en USD); costos de construcción de la planta (se estimó un 5% del valor de los equipos), costos de instalación (se estimó un 3 % del valor de los equipos); costos de mantenimiento

(se estimó un 25 % del valor de los equipos) estos tres últimos fueron estimados a partir de (FAO, op. cit.). En la Tabla 10 se muestran los demás costos relacionados con los costos fijos. Los costos directos fueron proyectados a 20 años.

Tabla 10. Ecuaciones de costos fijos.

Inversión total (USD)	Costo de equipos + Costo de construcción + Costo de instalación + Costo de la red de distribución	
Depreciación de equipos (USD por año)	Costo de equipos dividido por el tiempo de vida del proyecto	Método de la línea recta para el cálculo de la depreciación
Depreciación de construcción (USD por año)	Costo de construcción dividido por el tiempo de vida del proyecto	Método de la línea recta para el cálculo de la depreciación
Depreciación de instalación (USD por año)	Costo de instalación dividido por el tiempo de vida del proyecto	Método de la línea recta para el cálculo de la depreciación
Depreciación de la red de distribución (USD por año)	Costo de la red de distribución dividido por el tiempo de vida del proyecto	Método de la línea recta para el cálculo de la depreciación
Depreciación total (USD por año)	Depreciación de equipos + Depreciación de construcción + Depreciación de instalación + Depreciación de la red de distribución	Método de la línea recta para el cálculo de la depreciación
Costo de mantenimiento (USD por año)	Porcentaje de costo de mantenimiento (%) x Depreciación total	Porcentaje de costo de mantenimiento ingresado por el usuario Valor por defecto 10%
Costos fijos totales (USD por año)	Depreciación total + Costo de mantenimiento	

Fuente: (ídem)

5.1.6.3 Cálculo de otros costos

Los gastos generales de la planta se definen como los cargos a la producción por servicios, comodidades, nómina de planta. Los costos generales y administrativos comprenden rentas, seguros, y salarios de directivos, administrativos y ejecutivos. La Tabla 11 muestra las ecuaciones para calcular el costo asociado con los gastos generales de la planta, costos generales y administrativos. La sobrecarga de la planta se define como una carga para la producción de los servicios, las instalaciones, y los gastos generales de la nómina.

Tabla 11. Ecuaciones de otros costos.

Ítem	Ecuación y Supuesto	Observación
Gastos generales de la planta (USD por año)	Porcentaje de gastos generales de planta (%) x (Costo total de mano de obra + Costo de mantenimiento)	Porcentaje de gastos generales dado por el usuario. Valor por defecto 30%.
Costos administrativos y generales (USD por año)	Porcentaje de costos generales & administrativos (%) x (Costo total de insumos + costo total de mano de obra + Gastos generales de planta)	Porcentaje de costo generales & administrativos ingresado por el usuario. Valor por defecto 5%.

Fuente: (ídem)

5.1.6.4 Generación de potencia

Para calcular la generación de potencia primero se estima que el número de horas diarias operadas es de ocho horas.; las horas de operación diarias se utilizan para calcular el total de horas anuales de funcionamiento, suponiendo que el sistema funciona los 365 días del año se considera que el número de horas de operación anual es de 2920 horas. Segundo se multiplican las horas de operación anual (2920 horas) por la capacidad teórica de producción. Tercero se determina la capacidad de generación real multiplicando la capacidad teórica por el rendimiento de generación que se estimó cercano al 85%. Finalmente para determinar la generación de potencia de la planta se le resta a la capacidad real de generación un 10% para el consumo de la planta y un 6% debido a pérdidas en la red de distribución.

5.1.6.5 Resultados finales

La Tabla 12 presenta las ecuaciones de cálculo de los costos totales de operación, costos fijos y otros costos totales. Los resultados finales de estos costos son usados para calcular el costo total de producción de electricidad y el costo unitario de electricidad por kW/h.

Tabla 12. Ecuaciones del costo total de producción.

Ítem	Ecuación y Supuesto	Observación
Costos totales de operación (USD por año)	Costo anual de insumos + costo anual de mano de obra + costo anual de transporte + costo anual de almacenamiento	
Costos fijos totales (USD por año)	Costo fijo de depreciación + costo anual de mantenimiento	
Otros costos totales (USD por año)	Gastos generales de planta anuales + Costos generales & administrativos + Pago anual de préstamo + impuesto sobre la renta anual	
Costos totales de producción (USD por año)	Costos totales de operación + Costos fijos totales + Otros costos totales	
Costo de producción por kWh	Costo total de producción dividido por la generación de potencia	La ecuación de generación de potencia (kWh por año) se presenta en la Tabla 3

6. TECNOLOGÍAS DE TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA EN BIOENERGÍA.

La biomasa debe someterse a varios procesos para ser utilizada como fuente de energía, estos procesos tienen como finalidad aprovechar la energía acumulada de la biomasa, convirtiéndola en un combustible sólido, líquido, gaseoso o directamente en electricidad. En la Figura 6 se muestran la clasificación de las tecnologías de transformación de biomasa en bioenergía las cuales se pueden dividir en tres grandes grupos, bioquímicas, mecánicas y termoquímicas. (Martínez, 2014).

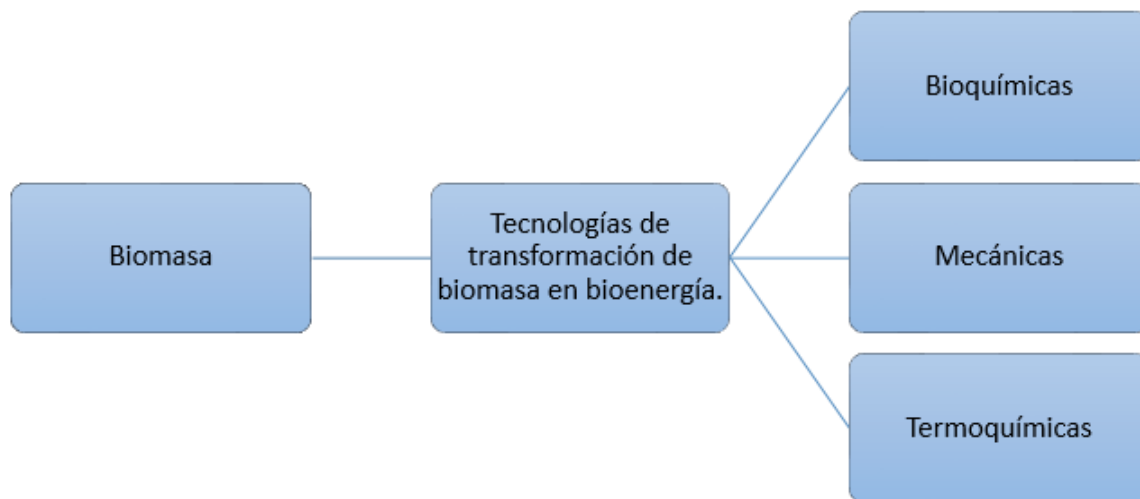


Figura 6. Clasificación tecnologías de transformación de biomasa en bioenergía.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Martínez, 2014).

6.1 TECNOLOGÍAS MECÁNICAS

Dentro de la biomasa residual se presentan gran variedad de formas, tamaños, y condiciones físicas y químicas, que caracterizan las diferentes fuentes de dicha biomasa; en un intento por aprovechar al mayor grado posible los residuos principalmente de la industria forestal (como serrines de madera, cortezas de coco y otros frutos, cascarilla de arroz, entre otros), que no se pueden reutilizar o convertir energéticamente por otras tecnologías debido a sus características, se ha avanzado en una tecnología mecánica para convertir dichos residuos en material combustible; es por ello que el proceso de fabricación de pellets de madera ha tomado auge.

El proceso de fabricación de pellets usados como combustible para calderas y estufas de biomasa se reduce a someter la biomasa de partida a altas presiones forzándola a pasar por un orificio redondo llamado troquel. Cuando se dan las condiciones adecuadas, la biomasa se “fusiona”, formando una masa sólida. Este proceso se denomina extrusión. Ciertas clases de biomasa (sobre todo la madera) producen pellets de muy alta calidad de forma natural, mientras que otros necesitan aditivos que actúen como “pegamento” para que el pellet no se disgregue. Sin embargo, la extrusión en la fabricación de pellets es sólo un paso de los muchos que conlleva el proceso al completo. Entre ellos, hay un molido del material, control de temperatura, extrusión, enfriado y envasado (Energías renovables, 2014)



Figura 7. Pellets producidos a partir de diferentes procesos y materiales

Fuente: (IEA, 2017)

Un aspecto importante de esta tecnología es que está centrada básicamente en el aprovechamiento de la industria maderera, ya que los residuos que esta produce, tiene las características físicas adecuadas tanto para su compresión, como un poder calorífico alto aprovechable; hoy en día se emplean otros tipos de biomásas para la producción de pellets, son denominados pellets de biomásas mixtas, y es a partir de la mezcla de distintos residuos agrícolas que se está demostrando la posibilidad de producir sólidos que poseen la suficiente dureza y resistencia al transporte y un poder calorífico cercano al de los pellets de madera (Carlos Forero, 2012).

En el proceso de producción de los pellets, se tienen generalmente una serie de sub-procesos para su obtención final, estos comúnmente son: la recolección de la materia prima, su traslado al centro de procesamiento, allí entra el material a un proceso de secado con el fin de garantizar un pellet con una humedad entre el 6-10%, posteriormente los residuos de gran o mediano tamaño son molidos hasta conseguir un tamaño de partículas adecuados para formar el pellet (que generalmente es un cilindro de 2.5cm como máximo), luego de ello son extruidos con algún tipo de aglutinante (si es necesario el uso de él), en una prensa paletizadora donde adquieren su forma común, posteriormente se deja enfriar el material y se tamiza para luego ser embalado y distribuido, ver Figura 8

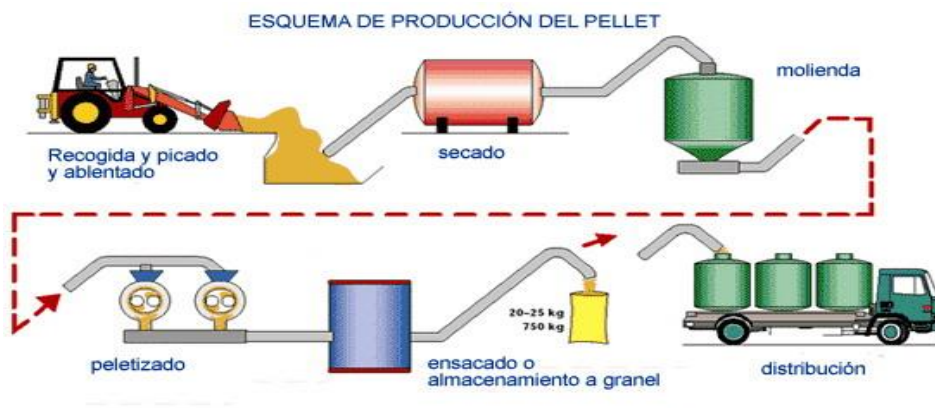


Figura 8. Proceso de producción de pellets.

Fuente: (López, 2014)

Otra opción para la densificación de la biomasa es la compactación en briquetas. Un producto de biomasa densificado se considera pellet si su diámetro es inferior a 2.5 cm., de lo contrario sería una briketa; además las briquetas no siempre tienen la forma de un cilindro. Otra diferencia importante es el grado de compactación, el pellet es mucho más compacto y uniforme (superior a 1Kg/dm³) (Clotario Tapia, 2006). Es por ello que en las instalaciones en las que actualmente se genera electricidad a partir de biomasa procesada mecánicamente, se prefieren los pellets en lugar de las briquetas, estas últimas están generalmente orientadas para calefacción.

Propiedades de los pellets

Para estimar el potencial que puede generar la biomasa que se encuentra en los pellets, es importante conocer su poder calorífico superior (HHV) basados en la composición del mismo, la Tabla 13 nos relaciona los valores asociados al poder calorífico superior de varias fuentes de biomasa:

Tabla 13. Poder calorífico superior para diversas fuentes de biomasa.

Biomasa	HHV
	MJ/kg
Carbón coquizado	25 a 32
Madera	10 a 20
Cáscara de Coco	18 a 19
Paja	14 a 16
Cáscara de Café	16
Tallos de Algodón	16
Cáscaras de cacao	13 a 16
Cuesco de Palma de Aceite	15
Cáscara de Arroz	13 a 14
Tallos de Maíz	13 a 15
Aserrín	11
Pellet de aserrín	20,5
Pellet de madera	20,3

Fuente: (Highman, 2003)

Como el mercado de los pellets ha amentado continuamente año tras año a nivel mundial (especialmente en Europa), se han creado normas internacionales que especifican ciertas propiedades tanto físicas como químicas para los pellets, para que con ello los pellets garanticen su calidad, además de otros parámetros ambientales correspondientes a su combustión. La Tabla 14 nos relaciona algunas propiedades fisicoquímicas de los pellets requeridas por las normas internacionales.

Tabla 14. Propiedades fisicoquímicas comunes de los pellets y briquetas.

Parámetro	Unidad	Pellet	Briqueta
Diámetro (D)	Mm	4 - 10	40 - 120
Longitud	Mm	< 5*D	<400
Densidad a Granel	Kg/m ³	>600	
Densidad de Partícula	Kg/m ³	>1,12	>1
Contenido de Agua	Wt% (b.h)	<10	<10
Contenido de Cenizas	Wt% (b.s)	<0,5	<0,5
Abrasión	Wt% (b.h)	<2,3	
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg (b.s)	>18	>18
C	Wt% (b.s)	~50	~50,5
H	Wt% (b.s)	~6	~5,6
N	Wt% (b.s)	<0,3	<0,3
S	mg/kg (b.s)	<400	<400
Cl	mg/kg (b.s)	<200	<200
K	mg/kg (b.s)	~490	~600
Cd	mg/kg (b.s)	<0,5	<0,5
Pb	mg/kg (b.s)	<10	<10
Zn	mg/kg (b.s)	<100	<100
Cr	mg/kg (b.s)	<8	<8
Cu	mg/kg (b.s)	<5	<5

Fuente: (I. Obernberger, 2004)

6.1.1 Vigilancia tecnológica de Pellets de biomasa

Con los datos resultantes en la búsqueda de patentes acerca de los Pellets de biomasa en el portal de portal *World intellectual property organization (WIPO)*, se grafican los datos en las siguientes figuras, que corresponden a la producción de patentes por país y por año en el periodo comprendido entre 2008 y 2017

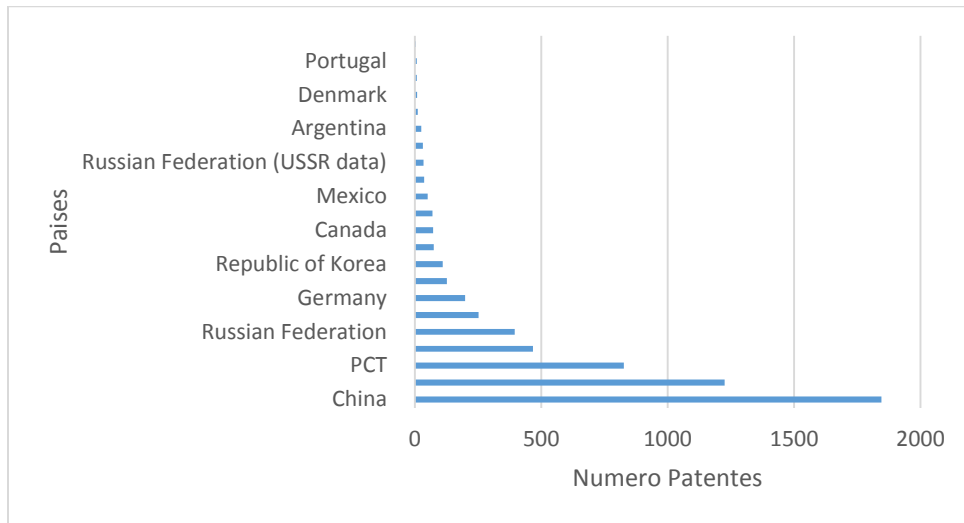


Figura 9. Distribución de patentes sobre producción de pellets de biomasa por países.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Patentscope.wipo.int, op. cit.)

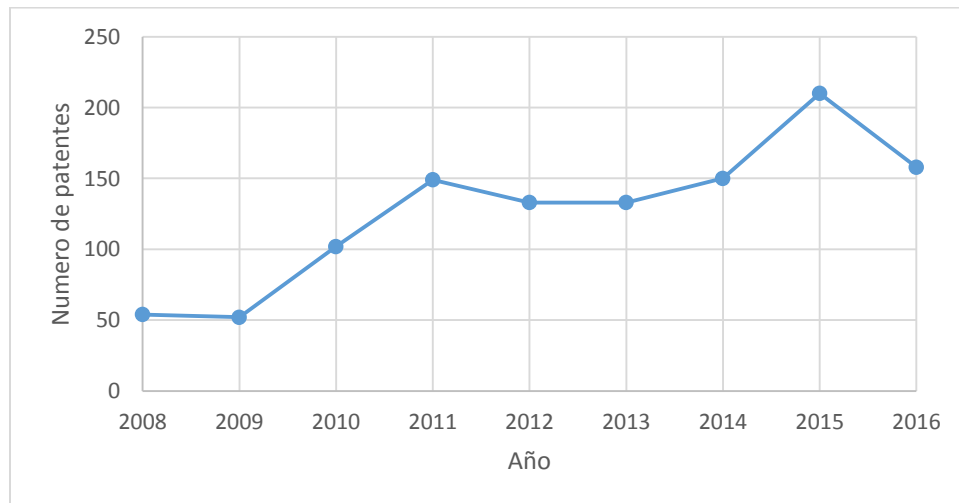


Figura 10. Variación de patentes sobre producción de pellets de biomasa por año.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ídem)

Al analizar los resultados de la búsqueda, se puede evidenciar que el sector asiático domina la producción de la tecnología para la producción de pellets de biomasa, siendo China el principal productor al aportar cerca del 31% de las patentes registradas; entre tanto Colombia ha registrado un total de 4 patentes en el tema, ocupando el puesto 20 en la lista de patentes en pellets. Esta tecnología de aprovechamiento de la biomasa ha registrado un aumento sostenido de patentes a lo largo del periodo consultado, comenzando con 54 patentes en el año 2008, y culminando con 201 en el 2017.

6.2.2 Capacidad de procesamiento plantas de pellets

En cuanto a la generación de electricidad en base a los pellets, Europa cuenta con la mayoría de estas plantas, de hecho una de las plantas eléctricas de biomasa más grandes del mundo funciona actualmente con pellets, se trata de la planta de Ironbridge, que cuenta con una capacidad de 740 MW, y está localizada en SevernGorge, Reino Unido; también se destaca la planta de biomasa KaukaanVoima localizada en Lappeenranta, Finlandia, cuenta con una capacidad eléctrica instalada de 125 MW. La central fue inaugurada en mayo de 2010, finalmente también encontramos la planta Seinäjoki, que cuenta con una potencia instalada de 125 MW y está localizada en la ciudad de Seinäjoki al sur de Ostrobotnia, Finlandia (Roca, 2016). Se calcula que en 2016 se destinaron cerca de 7.5 millones de toneladas de pellets para la generación de electricidad en Europa (cerca de 34.7% del consumo anual europeo) (AEBION, 2017).

Para la generación de energía eléctrica a partir de pellets, la norma europea (EN 14961-2:2011), ha logrado establecer características de calidad para los pellets, con el fin de regular el mercado de biocombustibles y asegurar aspectos ambientales y de emisiones de los mismos; la norma crea 3 clases de pellets, los cuales son establecidos gracias a las características físico químicas de los materiales con los que se producen, además de tener en cuenta las calderas en las cuales se hace más recomendable su combustión con fines de generación de electricidad; en la Tabla 15 se relacionan las características más relevantes de los tipos de pellets disponibles en el mercado.

Tabla 15. Principales características de los pellets, por su clase.

Clase Pellet	Potencia (kW)	Materia prima	Características
A1	<100	Madera virgen, madera sin tratar químicamente	Bajos contenidos de cenizas, nitrógeno y cloro.
A2	Utilizado en calefacción residencial.	Subproductos y residuos de la industria del procesado de la madera.	Contenido ligeramente más alto en cenizas, nitrógeno y/o cloro.
B	>100	Madera reciclada y residuos industriales.	Permiten diámetros más grandes, mayores contenidos de cenizas, nitrógeno, azufre y cloro y menores valores caloríficos netos.

Fuente: Adaptado de (IEA, Annual Report 2011, 2011)

A pesar de que la producción de pellets, ha llegado a ocupar un mercado amplio entre los biocombustibles, el desarrollo de las tecnologías que intervienen en su fabricación se ha mantenido en un constante refinamiento; actualmente esta tecnología de aprovechamiento de biomasa busca avanzar en diversos frentes de desarrollo, entre ellos, se avanza en la mejora del transporte del mismo, la Universidad de Queen en Kingston, Canadá, lidera una investigación para producir pellets de forma esférica, para que el transporte del mismo se efectúe por medio de tuberías (Hendry, 2017) ; Otro aspecto que se está investigando es la dinámica de fluidos que se presenta en la combustión de pellets en los prototipos de hornos a pequeña escala, esto con el fin de optimizar el proceso de combustión en cuanto a emisiones y eficiencia de los equipos, la Figura 11 muestra una simulación de dinámica de fluidos en hornos convencionales (izquierda) y los prototipos optimizados (derecha) que se están desarrollando.

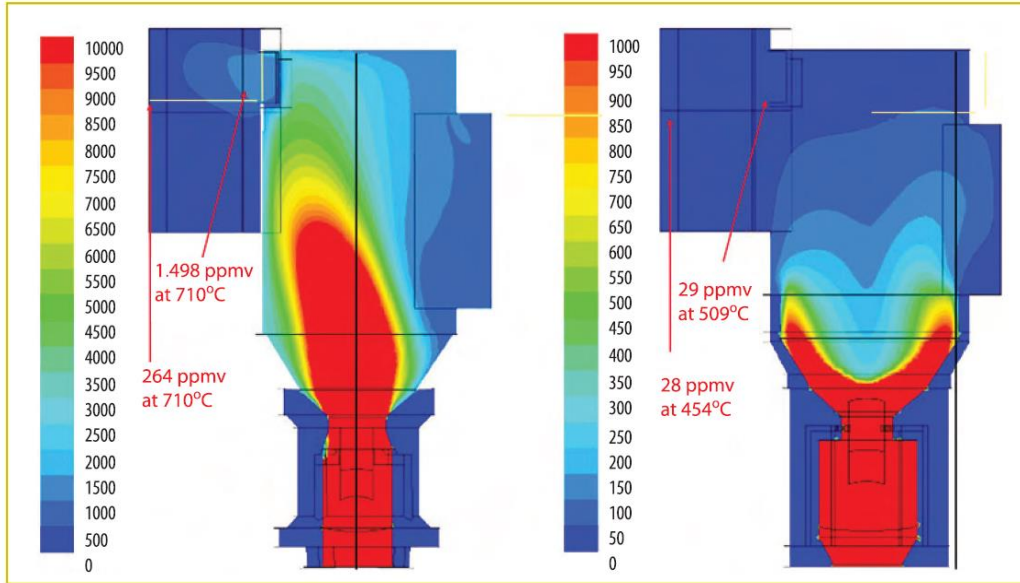


Figura 11. Simulación de dinámica de fluidos en hornos.

Fuente: (Ídem)

Finalmente un proceso de innovación emergente son los pellets de madera torrefactada, en este proceso, la madera se precalienta (esencialmente chamuscada) para cambiar su composición química, aumentando así su densidad aparente hasta en un 40 por ciento, haciéndola más resistente al agua y al impacto y maximizando su durabilidad. (Goetzl, 2015).

Energía eléctrica generada por tonelada biomasa

Se calcula el rendimiento de los diferentes sistemas de generación de energía, cabe destacar que se tomó como producto resultante del proceso mecánico, el pellet de madera estándar Tabla 15, con estos datos se procede a calcular la energía generada por tonelada de biomasa.

Tabla 16. Eficiencias tecnologías de conversión y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante pellets de biomasa.

Humedad Biomasa	Tipo Biocombustible	Toneladas por 100kW	Potencia teórica (kw)	Tecnología de conversión	η_e (%)	kW por tonelada
<15%	Pellet	1622,28	100	Planta térmica Pellets	30-37	0,061

Fuente: Elaboración propia a partir de (Comunidad de Madrid, op. cit.)

En la Tabla 16 se observan las eficiencias eléctricas de las tecnologías de conversión, cabe resaltar que para calcular la cantidad de biomasa necesaria para la producción de 1KW se tomaron datos del equipo de procesamiento más grande, además el porcentaje de eficiencia usado para los cálculos fue el mayor dentro del rango, con estos parámetros establecidos se determinó que para producir 1KW de energía eléctrica se necesita aproximadamente 0.061 toneladas de biomasa.

6.2.3 Nivel de madurez

Para determinar el nivel de madurez de la tecnología de transformación de biomasa mediante pelletización se establecieron tres criterios fundamentales como son: entorno, tipo de investigación- desarrollo tecnológico e innovación y su aplicación práctica, el criterio de menor nivel entre los 3 mencionados, va hacer el que determine el nivel de madurez de la tecnología. En la Tabla 17, se discriminan las condiciones de cada una de ellas.

Tabla 17. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante pelletización de biomasa.

Nivel	Descripcion	Justificacion
TRL 8	Entorno real	La tecnología se encuentra en un entorno real debido a que se encuentra certificado a través de pruebas y demostraciones.
TRL 8	Innovación	La tecnología es innovadora y se encuentra en fase de prototipos comerciales.
TRL 8	Producto o servicio comercializable	La tecnología está en etapa pre-comercial, pero con pruebas validadas.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Unión Europea, op. cit.)

De acuerdo a la clasificación de la Tabla 17 y usando la metodología antes descrita se determinó que el nivel de madurez de la tecnología es **TRL 8**.

6.2.4 Costos de producción total y unitario de electricidad

Para la estimación de los costos de producción total y unitario de electricidad a partir de pellets de cualquier material, se establece como referencia una planta que procese 1.5 ton/h de material, para alimentar la caldera, en estas condiciones el costo asociado a los equipos es de aproximadamente 745.000 dólares (Aldunate, 2015). En la Tabla 18 se muestran los posibles costos de producción de tres plantas de pellets de biomasa con tres potencias 10, 40 y 100 KW, cabe mencionar que entre más capacidad tenga la planta más grande será la inversión inicial sin embargo el costo unitario de electricidad será menor. En la metodología se exponen las distintas suposiciones y parámetros tomados para el cálculo de los diferentes costos, además en el Anexo A se puede ver más ampliamente el procedimiento realizado.

Tabla 18. Costos de producción total y unitario de electricidad planta de pellets de biomasa.

Ítem	Capacidad de generación (Kw de generación de energía)		
	10	40	100
Costos de operación totales (USD por año)	11836,000	22255,000	46563,000
Costos fijos totales (USD por año)	5130,000	20520,000	50958,000
Otros costos totales (USD por año)	4032,000	8187,000	15081,000
Costos totales de producción (USD por año)	20998,000	50962,000	112602,000
Costo de producción por kWh	1,007	0,611	0,540

Fuente: Elaboración propia a partir de (FAO, op. cit.)

6.2 TECNOLOGÍAS BIO-QUÍMICAS

Existen biomásas residuales que contienen grandes cantidades de humedad, como lo son por ejemplo: el estiércol de origen animal, aguas y lodos residuales, residuos urbanos, industriales y de alimentos, entre otros; en donde su materia orgánica se concentra en mezclas líquidas-sólidas; para la conversión de este tipo de biomásas húmedas se utilizan procesos bio-químicos; que entregan combustibles de buena calidad como: biogás, metanol, etanol y biodiesel, dependiendo del proceso que se utilice para degradar la materia orgánica, en los cuales generalmente se utilizan microorganismos que se encargan, a través de su metabolismo, en transformar la energía química presente en la biomasa, en gases y alcoholes carburantes. Los procesos más importantes que se engloban en esta tecnología son:

6.1.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia parcial o total de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases, en los cuales principalmente se encuentra el metano y el dióxido de carbono. El producto principal obtenido de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano en una proporción de 50 a 70% y dióxido de carbono (CO₂) de 30 a 50%, con pequeñas cantidades de otros componentes como nitrógeno (N), oxígeno (O₂), hidrógeno (H), sulfuro de hidrógeno (H₂S), estos valores dependen tanto de los microorganismos que se encuentren presentes como del proceso en sí (Corrales, 2015).

La digestión anaerobia se ha estudiado desde hace ya muchos años en el campo de la química; pero su aplicación como fuente de biogás se empezó a emplear a finales del siglo XIX cuando se empezaron a construir biodigestores que realizaban la tarea específica de concentrar el material orgánico bajo ciertas condiciones de temperatura, Ph, oxidación, tiempo de retención entre otros; además de lograr extraer el gas combustible que emanaba de él, de manera controlada y direccionada, los logros más representativos en cuanto a la evolución de esta tecnología de aprovechamiento de la biomasa residual se encuentran referenciados en las Tabla 19 y Tabla 20

Tabla 19. Cronología de la evolución del biogás

Año	Investigador	Aportación
Siglo XVII	Van Helmont	La descomposición de la materia orgánica produce gases inflamables
1776	Volta	No hay una relación directa entre la materia orgánica y los gases producidos
1804-1808	John Dalton y Humphery Devy	Determinaron que el gas inflamable es metano
1868	Bechamp	Se produce metano por medio de un proceso biológico
1890	Omelianski	<ul style="list-style-type: none"> • Aisló los microorganismos responsables de la producción de hidrógeno, ácido acético y ácido butírico durante la fermentación de la celulosa • El metano se forma por la reacción entre el hidrógeno y el anhídrido carbónico mediada por los microorganismos
1910	Sohngen	<ul style="list-style-type: none"> • La fermentación de materiales complejos ocurre por reacciones tipo Redox para formar hidrógeno, anhídrido carbónico y ácido acético • Demostró que el hidrógeno reacciona con el anhídrido carbónico para formar metano • Supuso que la descarboxilación del ácido acético formaba metano

Fuente: Adaptada de (Abassi, 2012),

Tabla 20. Cronología desarrollo del biodigestor

Año	Investigador / País	Aportación
1881	Mouras	Aplicó el biodigestor anaerobio para el tratamiento de aguas residuales, lo denominó "Automatic Scavenger"
1895	Cameron	Construyó un tanque similar al de Mouras pero con mejor eficiencia de tratamiento. Una parte del biogás se utilizaba para calor e iluminación.
1895-1969	Varios	Se desarrollo de tecnología para la estabilización de los lodos de las aguas residuales domésticas, como calentadores y mezcladores. Diseño de biodigestores para utilizar estiércol.
1944-1945	Alemania del Oeste	Surge la idea de utilizar desechos agrícolas como materia prima, así como desarrollar diferentes tipos de biodigestores
1950's	Francia	Instala más de 1,000 biodigestores anaerobios, desde tanques cubiertos hasta sistemas complejos
1960's	Canadá, EUA y Europa del Oeste	La principal materia prima para el biodigestor es el estiércol de animales
1967	¿?	Se introduce el concepto de Filtro Anaeróbico
1970's	Varios	Se aplica sistemas de biodigestión en tratamiento de aguas industriales, propiciado por el incremento del precio del petróleo

Fuente: (Ídem)

Como se ha anotado este proceso hace uso de grupos de bacterias que realizan un proceso biológico fermentativo sobre la materia orgánica para transformar la misma en componentes gaseosos que son combustibles; entre las materias orgánicas que se pueden descomponer por este método existe variedad de composiciones físicas que promueven distintos rendimientos en cuanto a la obtención de biogás, aunque hay que destacar que la biomasa que se descompone por este proceso se caracteriza por una alta carga orgánica y por tener concentraciones de humedad considerables; en la Tabla 21 se relacionan la composición y el rendimiento de producción de gas típicos para una variedad de fuentes de biomasa residual.

Tabla 21. Composición y rendimiento de producción de biogás de diferentes fuentes de biomasa residual.

Materia Prima	Materia Seca (%)	Materia Orgánica (% de MS)	Rendimiento de Biogás (m³/Ton MOS)	Rendimiento Biogás (m³/Ton Húmeda)
Cultivos energéticos ^(c)	-	-	550 a 750	-
Desechos agroindustriales ^(b)	-	-	400 a 800	-
Estiércol de vaca	7 a 15	65 a 85	200 a 400	9 a 51
Estiércol de puerco	3 a 13	65 a 85	350 a 550	7 a 61
Fracción orgánica de los RSM's	-	-	400 a 600	-
Gallinaza	10 a 20	70 a 80	350 a 550	24 a 88
Lodos de las aguas residuales	-	-	250 a 350	
Residuos de cultivos	-	-	300 a 400	-
Residuos del procesamiento de la carne	-	-	550 a 1,110	-
Desechos vegetales ^(a)	10 a 20	65 a 85	400 a 700	25 a 120
Ensilaje de maíz ^(a)	15 a 40	75 a 95	500 a 900	55 a 340
Ensilaje de pasto ^(a)	8 a 50	70 a 90	600 a 1,300	30 a 585

^(a) Puede variar de acuerdo al lugar, tratamiento, proceso y almacenaje

^(b) Como aguas residuales de la industria láctea y de la molienda de los aceites, residuos de la cerveza y de destilerías

^(c) Como maíz, sorgo, etc.

Fuente: Adaptada de (ECOFYS, 2005) y (Massi, 2012)

6.2.1.1 Clasificación de Biodigestores anaerobios

Existen varios criterios para clasificar los biodigestores anaerobios, sin embargo una de las clasificaciones más ampliamente difundidas y aceptadas está dada por el tipo de proceso que llevan, en los cuales encontramos procesos continuos, semicontinuos y discontinuos.

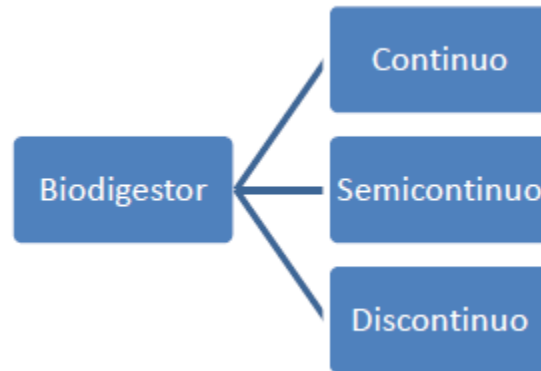


Figura 12. Clasificación de biodigestores según su proceso.

Fuente: (ECOFYS, 2005)

En los biodigestores continuos se cuenta con un biodigestor principal donde se lleva a cabo la extracción importante de biogás, y otro donde el material orgánico proveniente del biodigestor principal se almacena, este tanque post-digestión (TPD), tendrá como función tanto de almacenar el material, como de extraer el biogás que se encontrase en la materia que almacena; se conoce como biodigestor continuo, ya que el nivel del material orgánico en el biodigestor principal se mantiene constante, ya que la misma cantidad de biomasa residual que recibe, este la entrega al TPD en forma de lodos y material excedente, siendo continuo el flujo del material orgánico.

Los procesos discontinuos se caracterizan por un sistema basado en un biodigestor, el cual se llena con la biomasa y sustratos que favorecen el proceso metabólico de las bacterias anaerobias, este biodigestor es sellado luego de alcanzar su nivel de operación; desde este punto la producción de biogás

comienza, dependiendo de la temperatura de operación, después de un lapso de tiempo, el biodigestor habrá logrado llegar hasta el máximo de producción de biogás, es en este punto donde el biodigestor se vacía de su contenido tanto de biogás, como de material excedente; aquí el biodigestor queda listo para ser alimentado nuevamente de biomasa y repetir la operación.

En los procesos semicontinuos se evidencian características tanto del proceso continuo como del discontinuo. Aquí La materia orgánica es continuamente adicionada para llenar gradualmente el biodigestor. El estiércol digerido será almacenado en el biodigestor por el tiempo que sea necesario. Una vez que el biodigestor está lleno, cambiará de modalidad de operación de discontinuo a continuo. En esta etapa, si se le añade más sustrato al biodigestor, el lodo se irá hacia el tanque de almacenamiento de lodos; por lo regular estos tanques son más grandes que el TPD. La mayor desventaja de este proceso es que los lodos no se digieren completamente, por lo tanto el rendimiento de biogás es bajo comparado con los otros dos procesos (Jiménez, 2012).

6.2.1.2 Clasificación biodigestores

Biodigestor tipo Chino

El biodigestor de tipo chino o de cúpula fija es originario de la China, siendo un medio hermético en forma de tanque cilíndrico que va completamente escondido dentro de la tierra. Posee dos cámaras una de carga y la otra de descarga, es construido de ladrillos o de concreto armado con el fin de evitar fugas del sustrato cargado. Posee un tiempo de vida útil mayor a 15 años según el mantenimiento que se le dé (Jennifer García, 2015).

En este tipo de biodigestor el biogás generado es almacenado dentro de la cúpula fija. Son eficientes en la generación de carbón vegetal, debido a que el tiempo de retención es extenso.

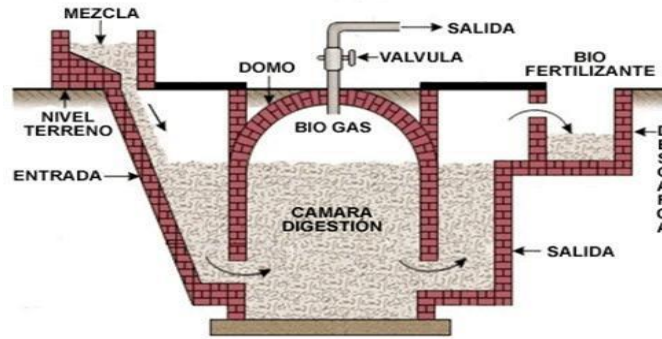


Figura 13. Vista transversal de un biodigestor tipo chino.

Fuente: ibídem

Biodigestor tipo hindú

Un biodigestor hindú o de campana flotante se compone de un digestor construido en mampostería o estructura de concreto y un depósito de gas móvil en forma de campana, la cual puede flotar directamente en la masa de fermentación o en un anillo de agua, dependiendo de la producción de biogás. La campana debe tener una guía que permita el movimiento vertical, cuya altura dependerá del volumen de gas almacenado. Puede ser utilizado cuando se necesita de un abastecimiento continuo de biogás y fertilizante, caracterizándose por funcionar como depósito del gas producido, es decir, es el único tipo de biodigestores que tienen un depósito de biogás interior (Arboleda, 2009).

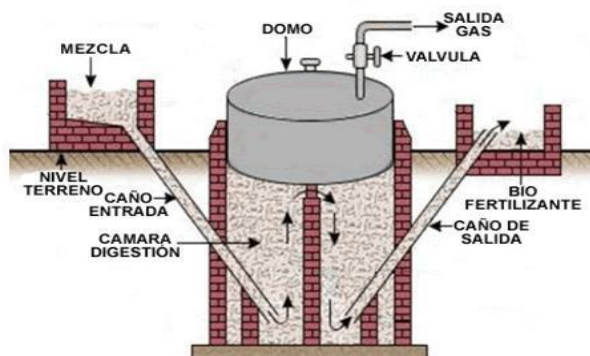


Figura 14. Vista transversal biodigestor hindú.

Fuente: op cit.

Biodigestores tipo Taiwán o de estructura flexible

El biodigestor tipo Taiwanés o de estructura flexible tiene su origen en Taiwán, su forma es usualmente alargada en forma de salchicha y están contruidos generalmente en polietileno, que es un material no permeable, para evitar la fuga del gas producido; como el biodigestor está cerrado completamente, el gas producido se irá almacenando paulatinamente en la parte superior del mismo, lo que ocasiona que el biodigestor se hinche, estos biodigestores cuentan con una entrada de material orgánico, y otra para la extracción del abono orgánico.

Este tipo de biodigestor es muy fácil de construir y es económico. Su desventaja es que tiene poco tiempo de vida útil, viéndose en la necesidad de construir uno nuevo cada tres años. También es muy delicado, puede sufrir roturas debido a las condiciones climáticas del lugar donde sean instalados y al igual por la influencia de acciones de los animales e incluso del hombre (Jennifer García, 2015).



Figura 15. Biodigestor tipo Taiwán.

Fuente: (Botero, 2017)

Biodigestores tipo laguna

Básicamente consisten en una piscina de purín cubierta por una membrana o alguna cubierta flotante la que llega hasta el límite del líquido previniendo el escape del gas acumulado a la atmosfera. Estos tipos de digestores están diseñados para funcionar con un contenido de sólidos menor al 2% y funcionan a temperatura ambiental, por lo que su rendimiento se ve fuertemente afectados por variaciones de la temperatura estacional y normalmente son usados en regiones cálidas. Los tiempos de retención hidráulica para estos modelos van desde los 35 días en las zonas más cálidas a 60 días en las más frías. Son los modelos menos costosos de instalar y operar (Susaeta, 2013).



Figura 16. Biodigestor tipo laguna.

Fuente: (vinibiodigestor)

Biodigestores tipo tanque

Este tipo de biodigestores son los más sencillos de fabricar y de controlar, son ampliamente utilizados en zonas rurales, debido a que su construcción es simple y su mantenimiento no es costoso, este tipo de biodigestores se clasifican como discontinuos ya que se cargan una sola vez con la biomasa y esta se retira cuando ya se ha dejado de producir gas, solo entonces se renueva de materia orgánica. Se usa cuando la disponibilidad de materia orgánica es limitada o intermitente.



Figura 17. Biodigestor tipo tanque.

Fuente: (Jeremías Arauz, 2012)

6.2.1.3 Capacidad de procesamiento biodigestion

Actualmente los países pioneros en la producción de biogás se enfocan en esta tecnología gracias a su desarrollo tecnológico o a la disponibilidad de biomasa para su producción; actualmente países como Alemania, Reino Unido, República Checa y Holanda son los líderes en el mercado europeo; entre tanto Países como Estados Unidos, China, Japón, Canadá e India, figuran como los principales productores de energía eléctrica a partir de biogás fuera del bloque europeo. Se estima que para finales del año 2016, se contaba con una potencia instalada de biogás de 7.400 MW, distribuidos en aproximadamente 14.000 instalaciones alrededor del mundo (Rico, 2016).

El aprovechamiento de la biomasa residual a través de la tecnología de digestión anaeróbica, como se observó anteriormente lleva muchos años de desarrollo y puesta a punto, por ello esta tecnología está ampliamente desarrollada y aplicada comercialmente en varios países a nivel mundial; dada la simplicidad que pueden llegar a tener los biodigestores en su construcción y funcionamiento, además de poder utilizar materiales de fácil acceso y bajo costo en su fabricación, es un proceso que se ha aplicado ampliamente en zonas apartadas y de vocación rural; se calcula que actualmente existen 30 millones de biodigestores en

funcionamiento a nivel mundial, pero en Latinoamérica sólo Cuba, Brasil, Costa Rica y Colombia han desarrollado esta tecnología en áreas rurales. Un ejemplo de una aplicación básica que se puede obtener gracias a los biodigestores es cocinar con el gas que generan (SGI&C-FNCER, 2017).

Actualmente el desarrollo de esta tecnología está encaminado principalmente a mejorar el proceso de obtención del biogás, desde la parte química del proceso mismo; como la inclusión de nanotecnología para optimizar la producción de gas, a través de la introducción controlada de nano partículas de óxido de hierro para el tratamiento de la materia orgánica (Barcelona, 2017). Otro aspecto en el que se está desarrollando e innovando, para el aprovechamiento de esta tecnología se centra en el perfeccionamiento y optimización de los motores que queman este tipo de combustible, ya que los componentes dañinos presentes en el biogás, especialmente el sulfuro de hidrógeno (H₂S), pueden acortar considerablemente la vida útil de un motor y causar daños graves (Energipedia, 2012).

El biogás que se utiliza para la generación de energía eléctrica, se quema principalmente en motores diésel modificados, motores a gas y en turbinas de gas; en la Tabla 22 se relacionan algunas características de los equipos que se consiguen en el mercado

Tabla 22. Características de los equipos utilizados para la generación de energía eléctrica a partir de biogás.

Equipo	Potencia (kW)	Combustible	Características
Motor Diésel	Hasta 200	Diésel + Biogás	Funcionan alternando la combustión del Diésel y el Biogás
Motor a gas	0.5-10	Biogás	Los motores de gas con encendido por chispa (sistema Otto) pueden funcionar solo con biogás.
Turbina de gas	30-75	Biogás	Son costosas, su complejidad conlleva a alta capacitación del personal a cargo.

Fuente: Adaptado de (Energipedia, 2012)

Energía eléctrica generada por tonelada de biomasa

Para realizar el cálculo de la energía suministrada por el proceso de digestión anaerobia por tonelada de materia prima, se tuvo en cuenta que la biomasa se presenta en condiciones húmedas, con un rendimiento medio de 207.3 m^3 por tonelada, adicionalmente el poder calorífico típico de biogás es de 7.0 KW/h por m^3 (Varnero, 2011), En la Figura 18, se muestra el producto derivado de la biodigestion anaerobia, posteriormente la Tabla 23, se observan las eficiencias eléctricas de las tecnologías de conversión, cabe resaltar que para calcular la cantidad de biomasa necesaria para la producción de 1 KW se tomaron datos del equipo de biodigestion más grande, además el porcentaje de eficiencia usado para los cálculos fue el mayor dentro del rango, con estos parámetros establecidos se determinó que para producir 1 KW de energía eléctrica se necesita entre $0,08$ y $0,221$ toneladas de biomasa.

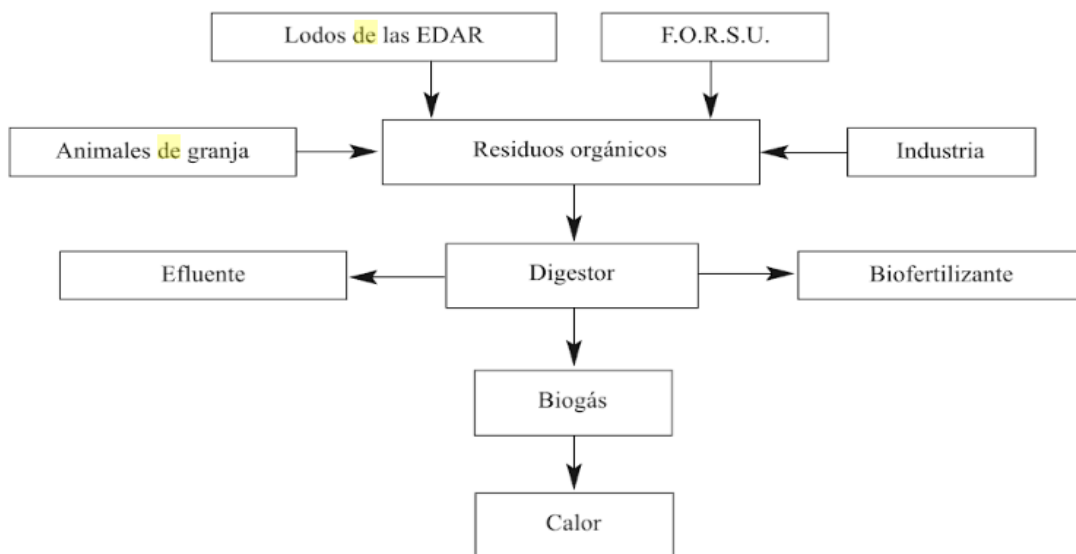


Figura 18. Producto derivado de la biodigestion.

Fuente: (Nogués, 2010)

Tabla 23. Eficiencias tecnologías de conversión y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante biodigestión.

Humedad Biomasa	Tipo Biocombustible	Toneladas por 100kW	Potencia teórica (kw)	Tecnología de conversión	η_e (%)	kW por tonelada
H>65%	Biogás	1242	100	Turbina de gas ciclo simple	15-21	0,08
		709,74		Turbina de gas y vapor en ciclo	25-35	0,14
		856,58		Motor de combustión interna	20-29	0,12
		1220		Turbina de vapor a condensador	15-20	0,08
		451,65		Pila de combustible	30-55	0,22

Fuente: Elaboración propia a partir de (FAO, op. cit.)

6.2.1.4 Vigilancia tecnológica de biogás y biodigestores

Para obtener el número de patentes relacionadas con la producción de biogás y biodigestores que se registran cada año, y el país del cual proceden las mismas; se hace uso de la base de datos del portal *World intellectual property organization* (WIPO), considerando el periodo comprendido entre 2008 a 2016, los resultados de las mismas se anexan a continuación:

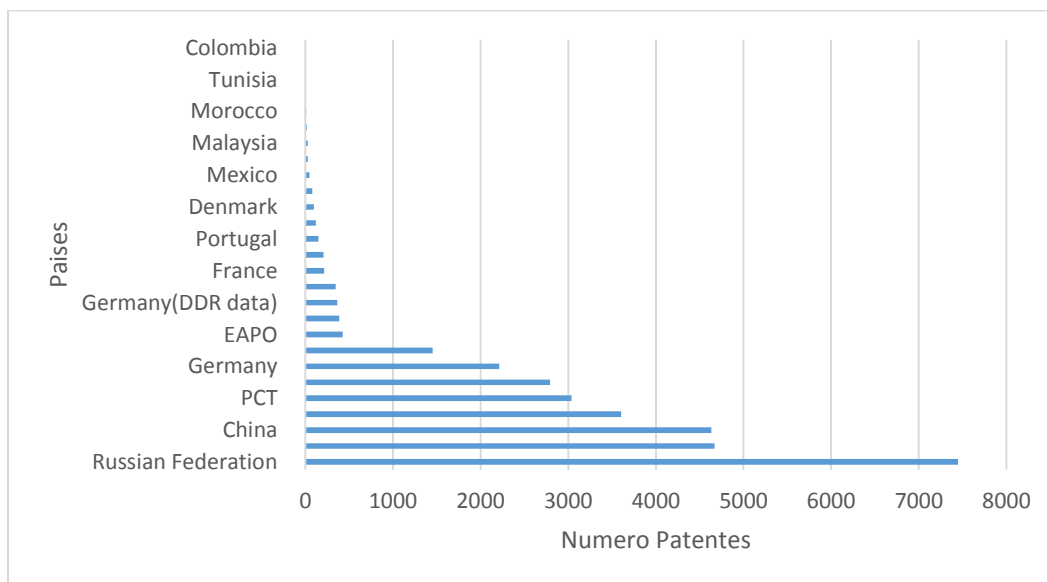


Figura 19. Distribución de patentes sobre producción de biogás por países.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Patentscope.wipo.int, 2018)

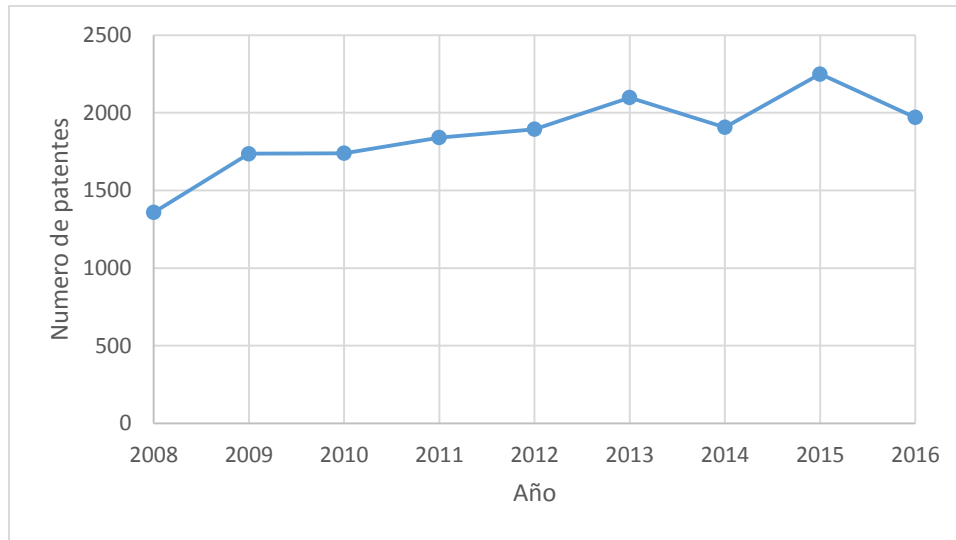


Figura 20. Variación de patentes sobre producción de biogás por años.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ídem)

Las distribuciones de patentes obtenidas muestran que la región asiática es la mayor productora de patentes, ya que tan solo Rusia, Japón y China concentran un poco más de la mitad de las 32.392 registradas a nivel mundial para el tema en el intervalo de tiempo analizado; entre tanto Brasil lidera la producción latinoamericana con 1.452 patentes, Colombia se ubica en la posición número 27 con 5 registros. En un análisis del comportamiento a lo largo de los años estudiados, se evidencia, que desde el año 2009 se ha mantenido una producción más o menos constante hasta el 2017, más específicamente en el rango de las 1.940 patentes por año.

6.2.1.5 Nivel de madurez

Para determinar el nivel de madurez de la tecnología de transformación de biomasa mediante digestión anaerobia se establecieron tres criterios fundamentales como son: entorno, tipo de investigación- desarrollo tecnológico e innovación y su aplicación práctica, el criterio de menor nivel entre los 3 mencionados, va hacer el que determine el nivel de madurez de la tecnología. En la Tabla 24, se discriminan las condiciones de cada una de ellas.

Tabla 24. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante digestión anaerobia de biomasa.

Nivel	Descripción	Justificación
TRL 9	Entorno real	La tecnología se encuentra en un entorno real debido a que ya se encuentra comercialmente.
TRL 9	Innovación	La tecnología es innovadora ya que es un nuevo producto introducido en el mercado.
TRL 9	Despliegue	La tecnología presenta una comercialización de alto despliegue.

Fuente: (Unión Europea, op. cit.)

De acuerdo a la clasificación de la Tabla 24 y usando la metodología antes descrita se determinó que el nivel de madurez de la tecnología es **TRL 9**.

6.2.1.6 Costos de producción total y unitario de electricidad

Para la estimación de los costos de producción total y unitario de electricidad de una planta de biodigestión de biomasa se toman suposiciones y parámetros los cuales han sido establecidos previamente en la metodología. En la Tabla 25 se muestran los posibles costos de producción de tres plantas biodigestión de biomasa con tres potencias 10, 40 y 100 KW, cabe mencionar que entre más capacidad tenga la planta más grande será la inversión inicial sin embargo el costo unitario de electricidad será menor. En el Anexo B se puede ver más ampliamente el procedimiento realizado.

Tabla 25. Costos de producción total y unitario de electricidad planta de biodigestión de biomasa.

Ítem	Capacidad de generación (Kw de generación de energía)		
	10	40	100
Costos de operación totales (USD por año)	11836,000	22255,000	46563,000
Costos fijos totales (USD por año)	3762,000	15048,000	37620,000
Otros costos totales (USD por año)	4032,000	8187,000	15081,000
Costos totales de producción (USD por año)	19630,000	45490,000	99264,000
Costo de producción por kWh	0,942	0,545	0,476

Fuente: Elaboración propia a partir de (FAO, op. cit.)

6.2.2 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

La fermentación alcohólica es un proceso que hace uso de microorganismos que procesan los hidratos de carbono, para degradar la biomasa residual y extraer de sí la energía química que tiene intrínsecamente, gracias a los procesos fotosintéticos que se llevaron a cabo en dicha biomasa y que transforman la energía irradiada por el sol, en energía química; los productos finales típicos de este proceso son alcoholes en forma de etanol que es utilizado como alternativa carburante para combustibles fósiles.

Una de las opciones para producir bioetanol es por fermentación a partir de materias primas ricas en carbohidratos (azúcar, almidón, celulosa, etcétera) de las frutas y vegetales como la caña de azúcar y la remolacha, los cereales (trigo, maíz, sorgo), los tubérculos (papas, yuca) y en general, materias provenientes de ligno-celulosas o de residuos orgánicos (Martínez, 2014).

La fermentación alcohólica es una bio-reacción que degrada los azúcares presentes en la biomasa en alcohol y dióxido de carbono. La conversión se constituye mediante la ecuación.

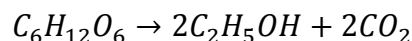


Figura 21. Proceso de fermentación del maíz para la obtención de etanol.

(Bgreenproject, 2013)

En este proceso el bio-reactor es un recipiente cilíndrico de doble pared, de vidrio o de acero inoxidable (para el control de la temperatura y esterilización en línea), cubierto de una platina de acero inoxidable. La platina está dotada de entradas y salidas que permiten agregar substratos, nutrientes y sustancias como ácidos o bases, extraer productos, o bien, hacer mediciones en línea. La platina permite acoplar un sistema de agitación para mantener la homogeneidad y facilitar, en su caso, la transferencia de oxígeno y nutrientes (Da Costa, 2007).

En el proceso de la fermentación de la biomasa, como en todos los otros procesos, existen varias fuentes de materia orgánica, en este caso este proceso hace uso de la biomasa proveniente de los cultivos de la caña de azúcar, maíz, remolacha azucarera, trigo, yuca y sorgo, cada una de las cuales tienen diferentes características fisicoquímicas y de consideraciones técnicas y de rendimiento, la Tabla 26 resume las características generales de los cultivos utilizados para la obtención de bioetanol:

Tabla 26. Características generales de los cultivos utilizados para la obtención de bioetanol.

Ítem	Caña de Azúcar	Maíz	Remolacha Azucarera	Trigo	Yuca / Mandioca	Sorgo
Temp. (°C)	25 – 26	25 – 30	20 – 25	10 – 24	Alta	27 – 28
Zona Climática	37° N – 31° S	58° N – 40° S	templado	templado y subtropical	trópicos húmedos (30° N - 30° S)	trópico con lluvias de verano
Acidez de Suelo (pH)	6 – 7,8	5,5 – 7,5	7 – 8,5	5,5 – 7,2	6 – 6,5	5 – 8,5
Producción después de	9 – 24 meses	4,7 meses	6 – 7 meses	3,6 – 5,5 meses	6 – 9 y 18 – 24 meses	2,6 – 3 y 4 – 8 meses
Reposición después de	5 años	Anual	Anual	Anual	0,5 – 2 años	Anual
Nutrientes (kg/ton)						
N	1,2	24	4,5	30	3	50
P	0,3	4	0,9	8	1	9
K	2,5	23	4 – 7	28	7	45
Ca	0,6	3	1,5	3	2	
Mg	0,4	3		3	1	
Agua mm/año (lt / m2)	1500 – 1800 (>2500 irrigada)	> 500	500	250 – 300 (400 – 900 HYV)	1000 – 2000	500 – 600
Etanol (lt/ton)	85	396	98	362	280	359
Rendimiento medio mundial (ton/ha)	40 – 80	3,6	30 – 40	2,3	9 – 10	1,3

Fuente: (Carlos Razo, 2007)

6.2.2.1 Capacidad de procesamiento fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica de la biomasa para la producción de alcohol carburante (etanol), es un proceso que es ampliamente conocido y es desarrollado a nivel mundial por diferentes países, siendo Estados Unidos el principal productor mundial al registrar cerca de 58 billones de litros de etanol en el 2016, seguido por Brasil con 27, China con 3.2, Canadá con 1.7; mientras que Colombia ocupa el puesto 15 con una producción 0.4 Billones de litros (REN21, 2017); Con ello se evidencia que Estados Unidos y Brasil cuentan con cerca del 90% de la producción mundial.

En Colombia la producción de etanol derivado de los procesos de fermentación de biomasa, se desarrollan principalmente en el valle geográfico del río Cauca, en donde las condiciones agro-climáticas son ideales para permitir la cosecha de caña de azúcar a lo largo de todo el año; el país cuenta con 8 plantas productoras de alcohol carburante, que producen cerca de 1.970.000 litros de etanol al día (Fedebiocombustibles, 2017).

En cuanto a la producción de electricidad en base a la combustión de etanol, solo se encuentra una planta a gran escala ubicada en Brasil, se trata de la planta Juiz de Fora (a 180 km de Río de Janeiro) es de ciclo simple y tiene una capacidad de 87 MW. (Dinero, 2010); El bajo número de centrales grandes y medianas de generación eléctrica en base a etanol que hay actualmente, se debe en parte a que las adecuaciones en los equipos de generación son algo complejos, adicionalmente el consumo de etanol para sustentar una pequeña central es considerable.

Sin embargo actualmente, el uso de etanol para la generación de energía eléctrica se está probando con éxito en prototipos de celdas de combustible de óxido sólido, estos sistemas alcanzan altas eficiencias teóricas, en el rango de 83.7-93.4%, estos valores clasifican al etanol como la segunda opción de combustible más valiosa para las celdas de óxido sólido después del gas natural, más que otros combustibles importantes, como la gasolina y el metanol. (S.L.Douvartzides, 2014).

Energía eléctrica generada por tonelada biomasa

Se calcula el rendimiento de los diferentes sistemas de generación de energía, cabe destacar que se tomó como producto resultante del proceso fermentativo, el bioetanol, con estos datos se procede a calcular la energía generada por tonelada de biomasa.

En la Tabla 27 se observan las eficiencias eléctricas de las tecnologías de conversión, cabe resaltar que para calcular la cantidad de biomasa necesaria para la producción de 1KW se tomaron datos del equipo de procesamiento más grande, además el porcentaje de eficiencia usado para los cálculos fue el mayor dentro del rango, con estos parámetros establecidos se determinó que para producir 1KW de energía eléctrica se necesita entre 0.072 a 0.179 toneladas de biomasa.

Tabla 27. Eficiencias tecnologías de conversión y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante fermentación de biomasa.

Humedad Biomasa	Tipo Biocombustible	Toneladas por 100kW	Potencia teórica (kw)	Tecnología de conversión	η_e (%)	kW por tonelada
H>65%	Bioetanol	1086,58	100	Motor de combustion interna	25-37	0,092
		1380,25		Motor Stirling	17-30	0,072
		557,46		Pila de combustible	30-55	0,179

Fuente: Elaboración propia a partir de (Comunidad de Madrid, 2010)

6.2.2.2 Vigilancia tecnológica de la fermentación de biomasa

Para la búsqueda de las patentes tecnológicas referentes al proceso de fermentación de biomasa en el portal de World intellectual property organization (WIPO), se hace la búsqueda de las mismas en el periodo de tiempo comprendido entre los años 2008 a 2016, los resultados de la misma se muestran a continuación:

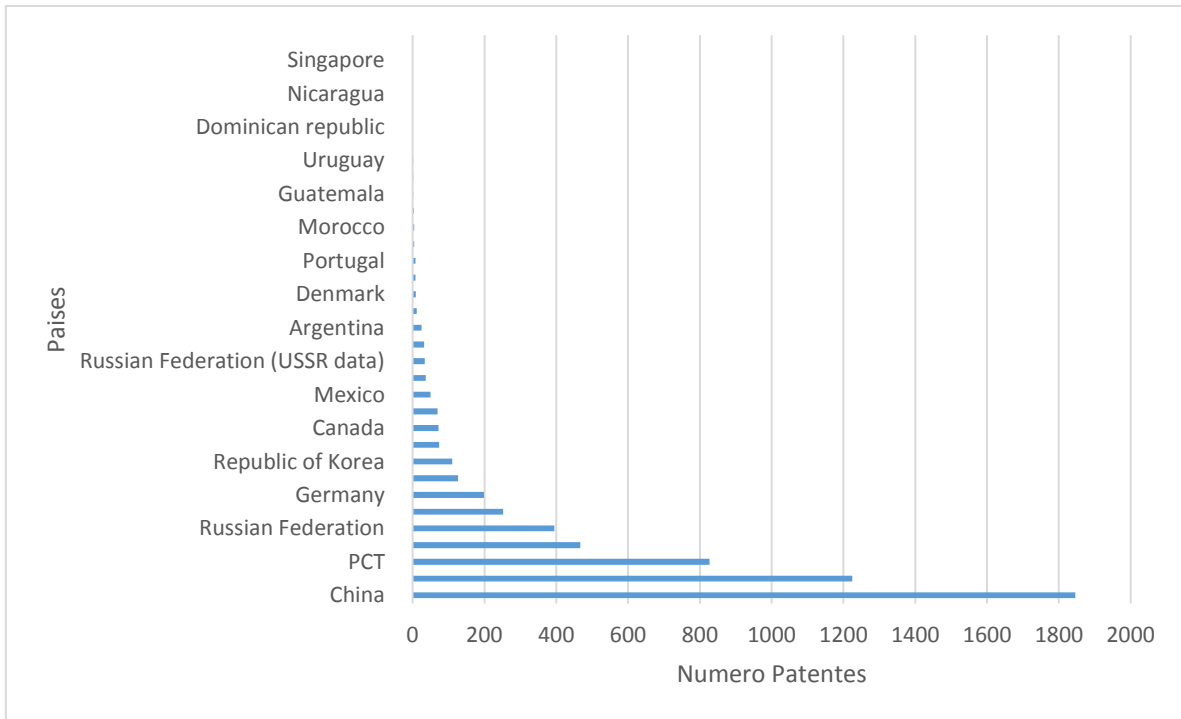


Figura 22. Distribución de patentes sobre fermentación de biomasa por país.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Patentscope.wipo.int, op. cit.)

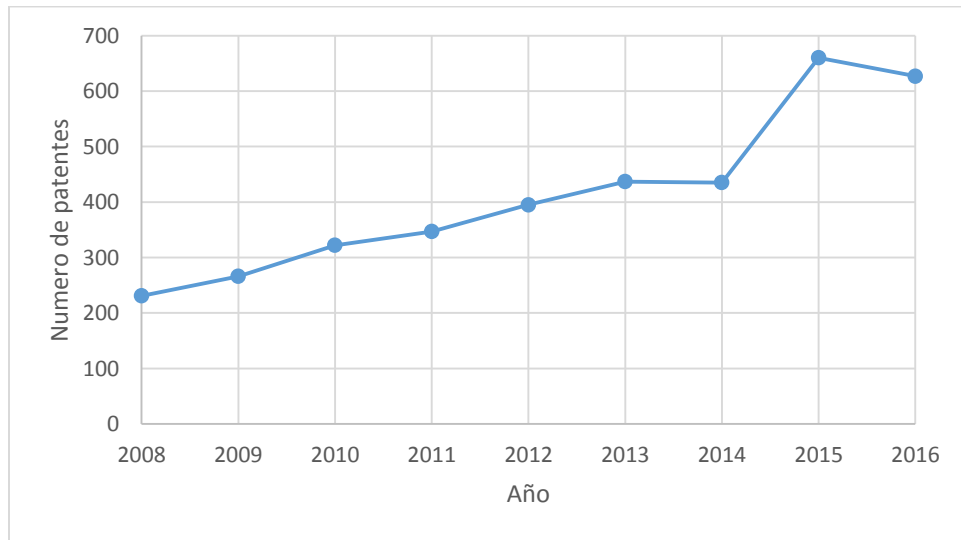


Figura 23. Fermentación de biomasa por año.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ídem)

Colombia en el ámbito de la fermentación de biomasa se adjudica un total de 11 patentes (cerca del 0.2% del total), ubicándose en el décimo octavo puesto; entre tanto los países que encabezan la lista son china (1809) y Japón (1218), por su parte Brasil ocupa el sexto puesto con 252 patentes. También se puede evidenciar que esta tecnología ha mantenido un crecimiento tecnológico a lo largo de la década consultada, teniendo un máximo de 660 patentes en el año 2015, con lo cual se deduce que la tecnología no ha alcanzado su pico de madurez.

6.2.2.3 Nivel de madurez

Para determinar el nivel de madurez de la tecnología de transformación de biomasa mediante digestión fermentación alcohólica se establecieron tres criterios fundamentales como son: entorno, tipo de investigación- desarrollo tecnológico e innovación y su aplicación práctica, el criterio de menor nivel entre los 3 mencionados, va hacer el que determine el nivel de madurez de la tecnología. En la Tabla 28, se discriminan las condiciones de cada una de ellas.

Tabla 28. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante fermentación alcohólica de biomasa.

Nivel	Descripcion	Justificacion
TRL 8	Entorno real	La tecnología se encuentra en un entorno real debido a que se encuentra certificado a través de pruebas y demostraciones.
TRL 7	Innovación	La tecnología es innovadora y se encuentra en validación en un entorno real.
TRL 9	Despliegue	La tecnología presenta una comercialización de alto despliegue.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Unión Europea, op. cit.)

De acuerdo a la clasificación de la Tabla 28 y usando la metodología antes descrita se determinó que le nivel de madurez de la tecnología es **TRL 7**.

6.2.2.4 Costos de producción total y unitario de electricidad

Para la estimación de los costos de producción total y unitario de electricidad de una planta de fermentación alcohólica de biomasa, se estima que el costo de los equipos está cerca de los 9.000 dólares por kW instalado, se asume que es una tecnología extracción-condensación, estudiada y aplicada en Brasil (Castro, 2016). En la Tabla 29 se muestran los posibles costos de producción de tres plantas de fermentación alcohólica de biomasa, con tres potencias 10, 40 y 100 KW, cabe mencionar que entre más capacidad tenga la planta más grande será la inversión inicial sin embargo el costo unitario de electricidad será menor. En la metodología se exponen las distintas suposiciones y parámetros tomados para el cálculo de los diferentes costos, además en el Anexo C se puede ver más ampliamente el procedimiento realizado.

Tabla 29. Costos de producción total y unitario de electricidad planta de fermentación alcohólica de biomasa.

Ítem	Capacidad de generación (Kw de generación de energía)		
	10	40	100
Costos de operación totales (USD por año)	11836,000	22255,000	46563,000
Costos fijos totales (USD por año)	6156,000	21888,000	61560,000
Otros costos totales (USD por año)	4032,000	8187,000	15081,000
Costos totales de producción (USD por año)	22024,000	52330,000	123204,000
Costo de producción por kWh	1,056	0,627	0,591

Fuente: Elaboración propia a partir de (FAO, op. cit.)

6.3 TECNOLOGÍAS TERMOQUÍMICAS

6.3.1 PIROLISIS

La pirolisis se define como un proceso termoquímico mediante el cual el material orgánico de los subproductos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua. (Pantoja Díaz, 2015)

Los gases combustibles resultantes son útiles para la producción de energía, una característica del proceso es que necesita de un aporte térmico, que generalmente es la combustión, esto quiere decir hay un consumo de combustible para dicho proceso. En la Figura 24 se muestra el esquema básico de una planta de pirolisis la cual produce aceite de pirolisis a partir de biomasa, se observa que además del aceite de pirolisis la planta también produce gas el cual puede ser usado para la generación de energía eléctrica.

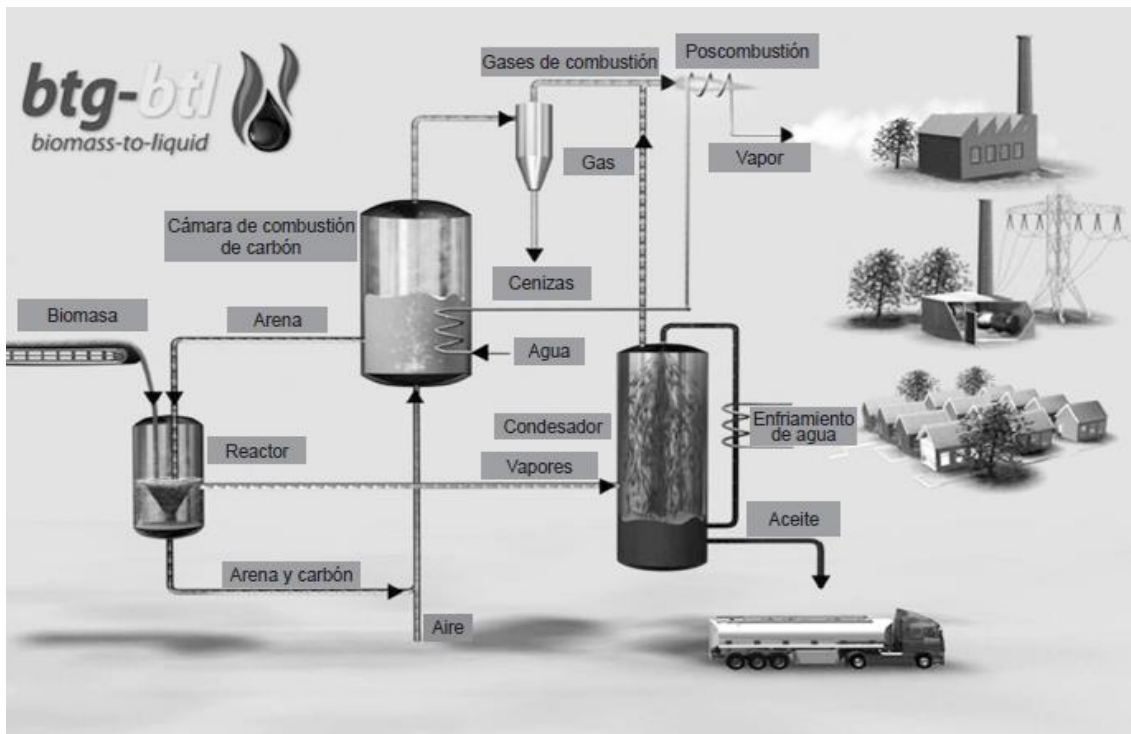


Figura 24. Diagrama simplificado proceso de pirolisis.

Fuente: (Zwebe, 2010)

En la actualidad existe una gran cantidad de equipos diseñados para la transformación de biomasa mediante pirolisis, estos pueden estar en una etapa de laboratorio y/o piloto, industrial y/o semi-industrial. Una de las tecnologías más avanzadas hoy en día es la pirolisis mediante reactores de lecho fijo, debido a que ya hay plantas operativas como son Bio-alternative ubicada en Suiza y la planta de madera de la Universidad de Cardiff, UK estos son claros ejemplos del uso de esta tecnología a escala industrial, estas tienen capacidades de producción de alrededor de 50 kg/h. (Zwebe, 2010)

Otro tipo de pirolisis relativamente usado es mediante reactores de lecho fluidizado el cual ha sido usado en la industria tanto en procesos químicos como para la obtención de petróleo desde hace más de 50 años, se ha desarrollado casi hasta nivel comercial, teniendo plantas piloto demostrativas y equipos de laboratorio para investigación con capacidades entre 3 y 300 kg/h, entre las principales se encuentran una empresa en Australia que procesa 300 kg/h de biomasa, Unión Fenosa en España con 200 kg/h y la Universidad Waterloo con un flujo de alimentación de 3 kg/h. A nivel industrial, la empresa Dynamotive de Canadá, patentó el proceso de pirolisis rápida de biomasa, en el cual usan como materia prima aserrín con una humedad inferior al 10%, a temperaturas de 450-500°C y tamaños de partícula entre 1 y 2 mm. (Ídem)

Además de estos tipos de pirolisis existen los que están en etapa de laboratorio o de piloto como son los de reactor de lecho fluidizado circulante, este tipo de tecnología ha sido ampliamente desarrollada por la empresa Ensyn en Ottawa-Canadá, donde la operación típica de este reactor es a temperaturas de 600°C y flujos de biomasa de 100 kg/h, con 6 mm, reactores de caída libre, este sistema es usado normalmente a escala de laboratorio para el estudio integral de la pirolisis de biomasa, reactores de abrasión, en la universidad de ASTON UK, el proceso se ha desarrollado con éxito usando flujos de alimentación de 3 kg/h, el proceso de escalamiento aún se está estudiando y se ha descubierto que este es un equipo óptimo para análisis de descomposición térmica de biomasa a pequeña escala, reactores de vacío, la empresa Pyrovac también construyó una planta

demostrativa en Janquiere, Quebec con una capacidad de 84 toneladas por día, utilizando temperaturas de 450 °C y presiones de 15 kpa, por último el reactor de cono rotatorio, el grupo de investigación BTG de la Universidad de Aston, UK, ha desarrollado esta tecnología a escala de laboratorio, a nivel de planta piloto con un flujo de alimentación de 200 kg/h y están construyendo una planta con capacidad de procesamiento de 2 t/h de biomasa; la materia prima que usan es el raquis de palma con un 70% de humedad, la cual es secada y triturada para alcanzar tamaños de partícula de 10 mm. (Ídem)

6.3.1.1 Clasificación de los procesos de pirolisis

El proceso de pirolisis se clasifica en tres grandes procesos convencional o lenta, rápida y ultrarrápida o flash, estos se diferencian entre si principalmente por la velocidad de calentamiento y la temperatura alcanzada en el proceso.

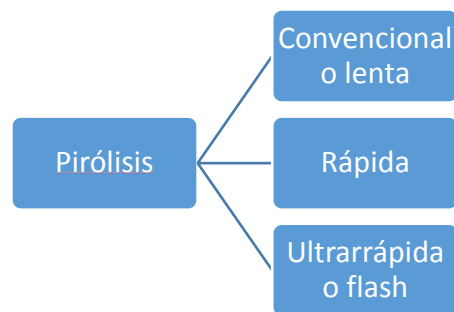


Figura 25. Clasificación de los procesos de pirolisis.

Fuente: (Urien Pinedo, op. cit.)

Convencional o lenta

Consta de un calentamiento de la biomasa lento, se alcanzan temperaturas máximas alrededor de 500-600°C. Se obtienen tres productos carbón vegetal (Bio-char) carbón vegetal, líquidos y gases.

Tiene como característica la producción de gas pobre el cual puede utilizarse directamente o bien como base para la síntesis de metanol. (Zwebe, op. cit.)

Rápida

La velocidad de calentamiento de la biomasa y temperatura es alta, ronda los 650°C. Se utiliza sobre todo para la producción de bioaceites ya que los rendimientos en peso de esta fracción son muy superiores a los que se obtienen en la pirolisis convencional, al igual se puede obtener metano e hidrocarburos superiores.

Actualmente, el proceso de pirolisis rápida es de gran importancia, es un proceso con una alta velocidad de transferencia de calor a la alimentación y un corto tiempo de residencia del vapor caliente en la zona de reacción.

Este proceso ha alcanzado un importante éxito comercial en la producción de sustancias químicas y está siendo activamente desarrollada para la producción de combustibles líquidos.

Ultra rápida o flash

Esta última pirolisis denominada pirolisis súbita (Fast), opera en tiempos cortos y a altas temperaturas (800°C- 1.000°C), permite obtener una pequeña parte de material sólido (10%) y convierte un 60% en gas rico en hidrógeno y monóxido de carbono. (Klug, 2012)

6.3.1.2 Procesos

Existen en la actualidad distintos procesos de pirolisis los cuales varían dependiendo de la velocidad de calentamiento, temperatura y tiempo de resistencia. La pirolisis es bastante flexible esto es de gran importancia debido a que podemos obtener distintos productos, oscilando entre las diferentes variables.

Tabla 30. Distintos procesos de pirolisis.

PROCESO	TIEMPO DE RESIDENCIA	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	TEMPERATURA (°C)	PRODUCTOS
CARBONIZACIÓN	Días	Muy lenta	400	Bio-char
CONVENCIONAL	5-30 min	Lenta	600	Gas, líquido y biochar
RÁPIDA	0,5-5 SEG	Muy rápida	650	Bioaceites
FLASH (LÍQUIDOS)	< 1 seg	Rápida	< 650	Bioaceites
FLASH (GAS)	< 1 seg	Rápida	< 650	Químicos y gas
ULTRARÁPIDA	< 0,5 seg	Muy rápida	1000	Químicos y gas
VACIO	2-30 seg	Media	400	Bioaceites
HIDROPIRÓLISIS	< 10 seg	Rápida	< 500	Bioaceites
METANOPIRÓLISIS	< 10 seg	Rápida	> 700	Químicos

Fuente: (Gónzales Gavilánez & Lucía Izabela, 2012)

6.3.1.2 Capacidad de procesamiento pirolisis

La pirolisis de biomasa es una de las tecnologías más desarrolladas actualmente, hoy en día hay empresas que ya venden este tipo de tecnología, por ejemplo Shanghai, China existe una empresa especialista en el procesamiento integral de residuos, suministra todo tipo de máquinas de eliminación de residuos, dentro de las cuales está la plantas de generación de electricidad mediante pirolisis de lecho fijo y reactor Bach, la Tabla 31 muestra algunas especificaciones de dicha planta.

Tabla 31. Especificaciones planta pirolisis de biomasa.

Equipo	Item						Unidad
	BLJ-6	BLJ-10	BLL-16	BLL-30	BLL-40	BLL-50	
Cantidad biomasa	144	340	480	720	960	1200	t
Capacidad por hora	24	30	54	58	62	84	KW/h
Capacidad por año	70,08	87,6	157,68	169,36	181,04	245,28	MW

Fuente: Elaboración propia a partir de (Kingtiger Group, op. cit.)

De la tabla anterior se aclara que la capacidad por año se calculó para una planta operando 2920 horas, se puede observar que la generación de energía de una

planta de pirolisis en un año varía entre 70 MW y 160 MW, esto depende del tamaño de los equipos y por consiguiente su capacidad de procesamiento de biomasa.

Energía eléctrica generada por tonelada biomasa

Se calcula el rendimiento de los diferentes sistemas de generación de energía, cabe destacar que se tomó como producto resultante del proceso pirolisis el aceite de pirolisis Figura 26 con estos datos se procede a calcular la energía generada por tonelada de biomasa.

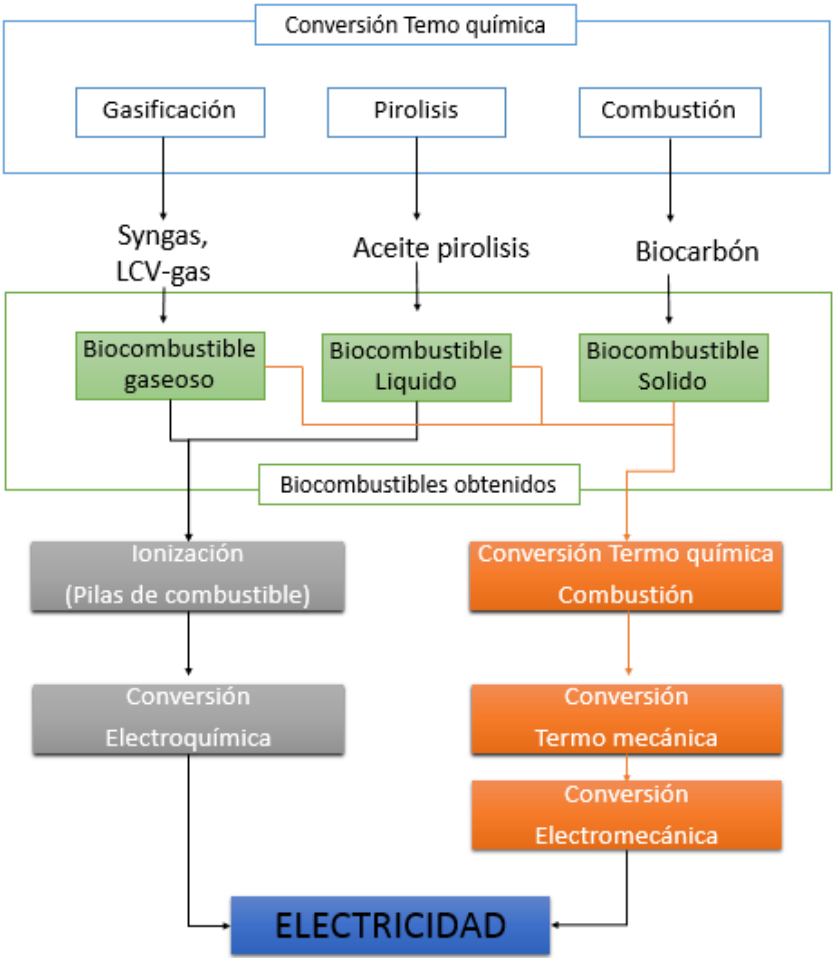


Figura 26. Biocombustibles obtenidos a partir de tecnologías termo químicas de transformación de biomasa.

Fuente: Elaboración propia a partir de (FAO, op. cit.)

En la Tabla 32 se observan las eficiencias eléctricas de las tecnologías de conversión, cabe resaltar que para calcular la cantidad de biomasa necesaria para la producción de 1KW se tomaron datos del equipo de pirolisis más pequeño, además el porcentaje de eficiencia usado para los cálculos fue el mayor dentro del rango, con estos parámetros establecidos se determinó que para producir 1KW de energía eléctrica se necesita entre 0,050 y 0,092 toneladas de biomasa.

Tabla 32. Eficiencias tecnologías de conversión y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante pirolisis.

Humedad Biomasa	Tipo Biocombustible	Toneladas por 100 KW	Potencia Teórica (KW)	Tecnología de conversión	η_e (%)	KW por Tonelada
H < 50%	Aceite pirolisis	2000	100	Turbina de gas	15 - 30	0,050
		2000		Motor Stirling	17 - 30	0,050
		1333		Motor combustión interna (MACI)	25 - 45	0,075
		1091		Pila de combustible	30 - 55	0,092

Fuente: Elaboración propia a partir de (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos op. cit.)

6.3.1.2 Vigilancia tecnológica de la pirolisis de biomasa

La búsqueda de patentes sobre pirolisis de biomasa se ha realizado en la base de datos <https://patentscope.wipo.int> considerando las invenciones patentadas desde el año 2008 hasta diciembre de 2016.

El análisis de los resultados obtenidos muestra que los países con mayor interés en el tema son China (669), Japón (332) y Rusia (133) (Figura 26). La región asiática se encuentra a la cabeza de esta línea de investigación, pues el número de patentes asiáticas supone casi el 55% del total. Por su parte, Colombia no cuenta con ninguna patente registrada, concordando con la media en la región latinoamericana exceptuando México y Brasil, para dicho análisis las patentes del Tratado de Cooperación en materia de Patentes (PTC) y European Patent Office no se contaron como país debido a que son tratados encargados de conseguir patentes nacionales en todos los países firmantes de dicho tratado.

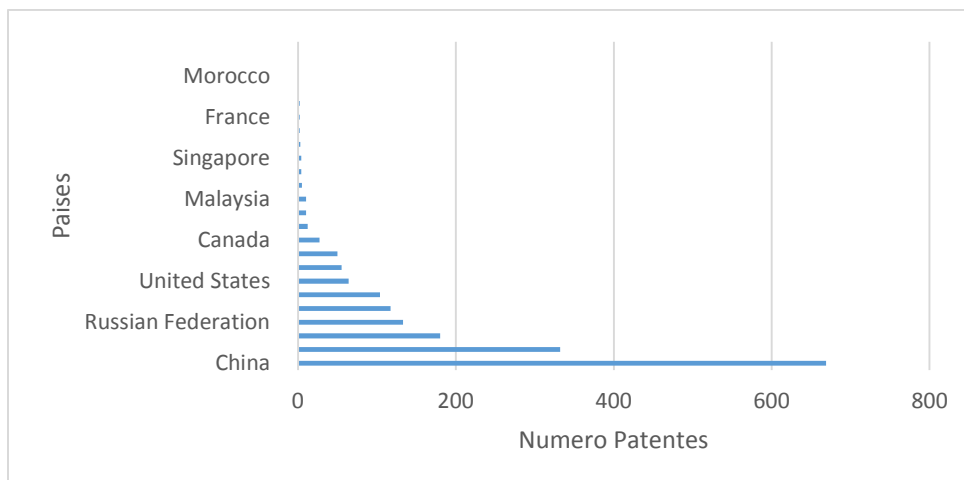


Figura 27. Distribución de patentes sobre pirolisis de biomasa por países.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Patentscope.wipo.int, op. cit.)

La evolución de la investigación sobre pirolisis de biomasa se ve reflejada en función del número de invenciones patentadas durante los últimos 9 años a nivel mundial, se muestra en la Figura 28 un aumento rápido y progresivo en el número de patentes hasta el año 2016. En nueve años el aumento en patentes relacionadas con este tema es aproximadamente de un 253%.

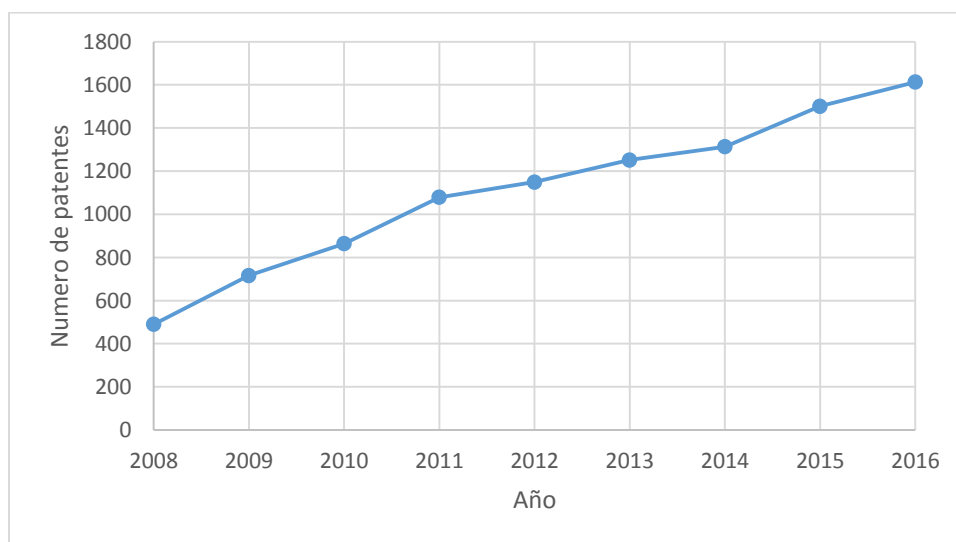


Figura 28. Variación de patentes sobre pirolisis de biomasa por años.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ídem)

6.3.1.2 Nivel de madurez

Para determinar el nivel de madurez de la tecnología de transformación de biomasa mediante pirolisis se establecieron tres criterios fundamentales como son: entorno tipo de investigación, desarrollo tecnológico e innovación y por ultimo su aplicación práctica, el criterio de menor nivel va hacer el que determine dicho nivel. En la Tabla 33, se discriminan las condiciones de cada una de ellas.

Tabla 33. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante pirolisis.

Nivel	Descripcion	Justificacion
TRL 9	Entorno real	La tecnología se encuentra en un entorno real debido a que ya se encuentra comercialmente.
TRL 9	Innovación	La tecnología es innovadora ya que es un nuevo producto introducido en el mercado.
TRL 8	Producto o servicio comerciable certificaciones pruebas específicas	La tecnología no está a un nivel más alto gracias a que no presenta una comercialización de alto despliegue.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Unión Europea, op. cit.)

De acuerdo a la clasificación de la Tabla 33 y usando la metodología antes descrita se determinó que le nivel de madurez de la tecnología es **TRL 8**.

6.3.1.6 Costo de producción total y unitario de electricidad

Para la estimación de los costos de producción total y unitario de electricidad de una planta pirolisis de biomasa, se estima que el costo de los equipos está cerca de los 8.000 dólares por kW instalado (GAIA, op. cit.). En la Tabla 34 se muestran los posibles costos de producción de tres plantas pirolisis de biomasa, con tres potencias 10, 40 y 100 KW, cabe mencionar que entre más capacidad tenga la planta más grande será la inversión inicial sin embargo el costo unitario de electricidad será menor. En la metodología se exponen las distintas suposiciones y

parámetros tomados para el cálculo de los diferentes costos, además en el Anexo D se puede ver más ampliamente el procedimiento realizado.

Tabla 34. Costos de producción total y unitario de electricidad planta de pirolisis biomasa.

Ítem	Capacidad de generación (Kw de generación de energía)		
	10	40	100
Costos de operación totales (USD por año)	11836,000	22255,000	46563,000
Costos fijos totales (USD por año)	5472,000	21888,000	54720,000
Otros costos totales (USD por año)	4032,000	8187,000	15081,000
Costos totales de producción (USD por año)	21340,000	52330,000	116364,000
Costo de producción por kWh	1,024	0,627	0,558

Fuente: Elaboración propia a partir de (FAO, op. cit.)

En la Figura 30 se muestra como el carbón es la materia prima más utilizada en el proceso de gasificación 51%. El petróleo suministra el 25% de las materias primas, el gas natural con el 22%. Y el restante con tan solo un 2% es la biomasa, lo nos muestra claramente el nivel de utilización y desarrollo de la biomasa y su respectiva tecnología de transformación mediante gasificación. (Ídem)

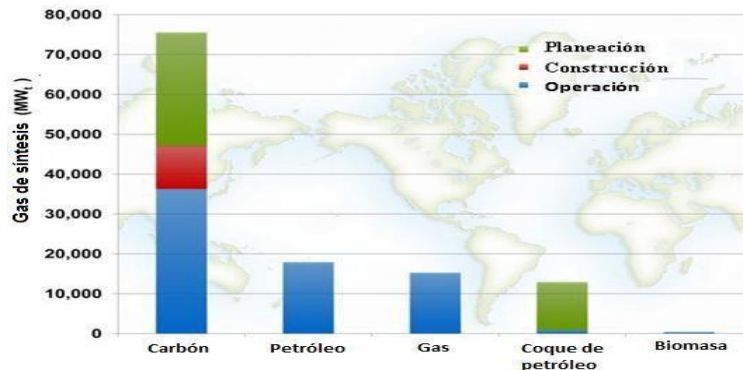


Figura 30. Capacidad mundial de la gasificación y crecimiento planificado por producto.

Fuente: (Ídem)

Agente gasificaste

Para la generación de energía eléctrica el agente gasificaste más apropiado es el H_2 ya que produce un gas de alto poder energético que puede utilizarse como sustituto el Gas Natural. Sin embargo el más usado es aire debido a razones económicas. (Urien Prieto, op. cit.)

Presión y temperatura

Aumentando la presión se acrecienta las proporciones de hidrocarburos, al igual que el incremento de la temperatura favorecen el contenido en el gas producto de H_2 y CO y disminuyen CH_4 y del H_2O .

6.3.2.1 Clasificación

La clasificación más usada en gasificadores es por el tipo de lecho, en este trabajo se manejan 3 grandes tipos lecho, el móvil en contra corriente, corriente paralela y fluidizado en la Figura 31 se observan las diferencias de cada uno de ellos.

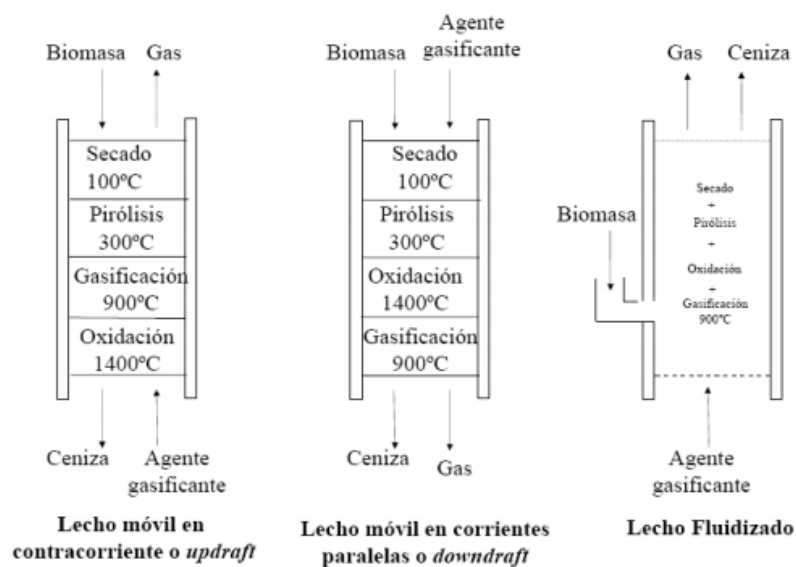


Figura 31. Comparación entre diferentes tipos de lechos para gasificación.

Fuente: (Urien Prieto, op. cit.)

Lecho móvil Updraft

Se caracteriza por circular en contracorriente el combustible y el agente gasificante, logrando altas eficiencias, aunque por otro lado este sistema de gasificación aumenta el alto contenido de alquitrán del gas producido.

Lecho móvil Downdraft

Se caracteriza por circular una misma corriente el combustible y el agente gasificante, requiere un tiempo prolongado de encendido, además no es tan

eficiente como el updraft, pero tiene la ventaja de no tener tanto contenido de alquitrán.

Los gasificadores de lecho móvil se utilizan para biomasa triturada con dimensiones de uno a diez cm.

Lecho fluidizado

En este tipo de gasificador el agente gasificante se mantiene en suspensión, al tener esta característica hacen que este tipo de gasificadores sean muy versátiles y no son sensibles a las características del combustible, exceptuando el tamaño.

6.3.2.2 Capacidad de procesamiento gasificación

Hoy en día la gasificación de biomasa es particularmente atractiva para estaciones de baja capacidad (<10 MW) y exhibe índices de eficiencia de alrededor de 35 - 40% o sea por encima de los ciclos tradicionales (<30%). Las aplicaciones más extendidas de gas pobre son: turbinas de gas, ciclos combinados, la producción de químicos y, más recientemente, la generación de energía en las celdas de combustible de alta eficiencia (Sadhukhan, Zhao, Shah, & Brandon, 2010)

Para determinar la capacidad de una planta gasificación de biomasa se investigó sobre las distintas capacidades, basado en Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura se determinaron 10 KW, 40KW y 100KW además del tipo de gasificador el cual es de corriente descendente.

Tabla 35. Especificaciones planta gasificación de biomasa.

	Item			Unidad
Equipo	Gasificador de corriente descendente			
Cantidad biomasa	156	625	1562	t
Potencia	10	40	100	KW

Fuente: (FAO, op. cit.)

Energía eléctrica generada por tonelada biomasa

Se calcula el rendimiento de los diferentes sistemas de generación de energía, cabe destacar que se tomó como producto resultante del proceso gasificación el Syngas o gas de gasificación. Tabla 36 con estos datos se procede a calcular la energía generada por tonelada de biomasa.

Tabla 36. Eficiencias tecnologías de conversión y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante gasificación.

Humedad Biomasa	Tipo Biocombustible	Toneladas por 100 KW	Potencia Teórica (KW)	Tecnología de conversión	η_e (%)	KW por Tonelada
H < 50%	Syngas, LCV-gas	3038	100	Turbina de gas de ciclo simple	15 - 21	0,033
		1823		Turbina de gas y de vapor en ciclo	25 - 35	0,055
		2200		Motor combustión interna	20 - 29	0,045
		3190		Turbina de vapor a condensación	15 - 20	0,031
		1823		Pila de combustible	18 - 35	0,055

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ídem)

En la Tabla 36 se observan las eficiencias eléctricas de las tecnologías de conversión, cabe resaltar que para calcular la cantidad de biomasa necesaria para la producción de 1KW se tomaron datos del equipo de gasificación más grande, además el porcentaje de eficiencia usado para los cálculos fue el mayor dentro del rango, con estos parámetros establecidos se determinó que para producir 1KW de energía eléctrica se necesita entre 0,033 y 0,055 toneladas de biomasa.

6.3.2.3 Vigilancia tecnológica de la gasificación de biomasa

La búsqueda de patentes sobre gasificación de biomasa se ha realizado en la base de datos <https://patentscope.wipo.int> considerando las invenciones patentadas desde el año 2008 hasta diciembre de 2016.

El análisis de los resultados obtenidos muestra que los países con mayor interés en el tema son China (1857), Japón (119) y República de Corea (98) Figura 32 La región asiática se encuentra a la cabeza de esta línea de investigación, pues el

número de patentes asiáticas supone casi el 75% del total. Por su parte, Colombia cuenta con (1) patente, siendo uno de los países con menos patentes en la región latinoamericana, para dicho análisis las patentes del Tratado de Cooperación en materia de Patentes (PTC) y European Patent Office no se contaron como país debido a que son tratados encargados de conseguir patentes nacionales en todos los países firmantes de dicho tratado.

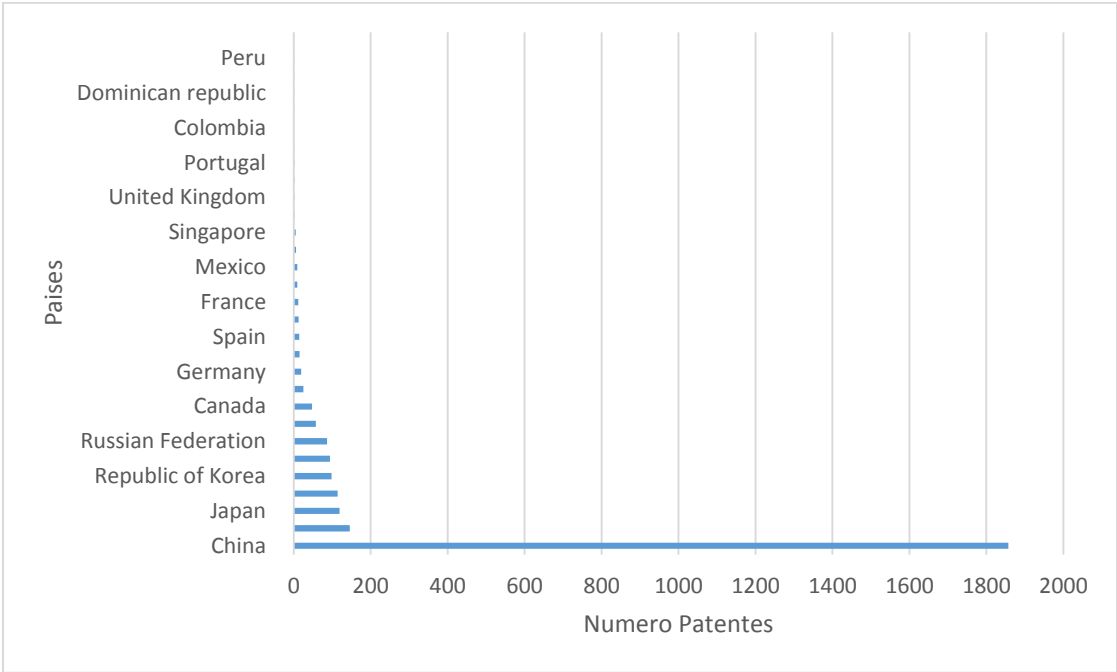


Figura 32. Distribución de patentes sobre gasificación de biomasa por países.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Patentscope.wipo.int. op. cit.)

La evolución de la investigación sobre gasificación de biomasa se ve reflejada en función del número de invenciones patentadas durante los últimos 10 años a nivel mundial, se muestra en la Figura 33 un aumento rápido y progresivo en el número de patentes hasta el año 2016. En diez años el aumento en patentes relacionadas con este tema es aproximadamente de un 177%.

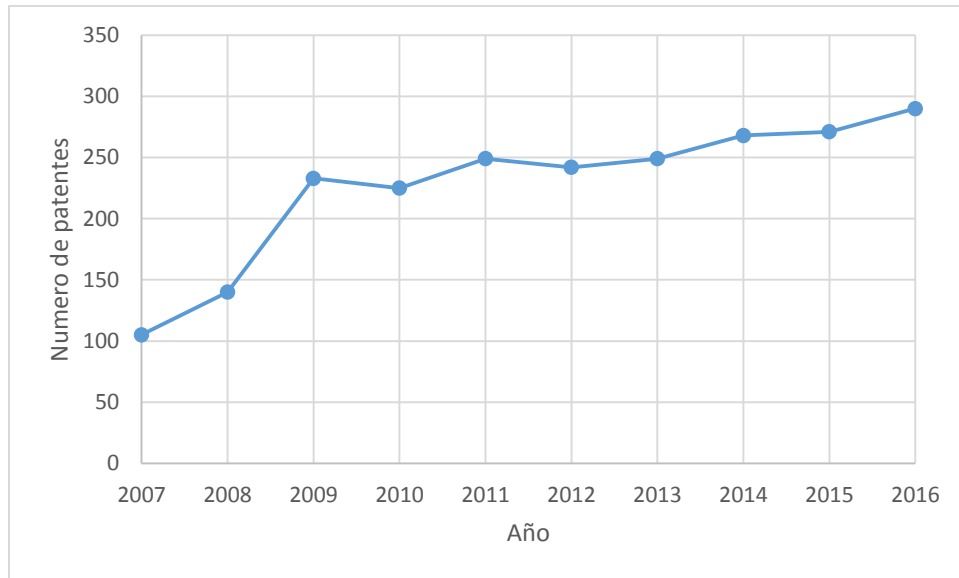


Figura 33. Variación de patentes sobre gasificación de biomasa por años.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ídem)

6.3.2.4 Nivel de madurez

Para determinar el nivel de madurez de la tecnología de transformación de biomasa mediante gasificación se establecieron tres criterios fundamentales como son: entorno tipo de investigación, desarrollo tecnológico e innovación y por ultimo su aplicación práctica, el criterio de menor nivel va hacer el que determine dicho nivel. En la Tabla 37 se discriminan las condiciones de cada una de ellas.

Tabla 37. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante gasificación.

Nivel	Descripcion	Justificacion
TRL 9	Entorno real	La tecnología se encuentra en un entorno real debido a que ya se encuentra comercialmente.
TRL 9	Innovación	La tecnología es innovadora ya que es un nuevo producto introducido en el mercado.
TRL 8	Producto o servicio comerciable certificaciones pruebas específicas	La tecnología no está a un nivel más alto gracias a que no presenta una comercialización de alto despliegue.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Unión Europea, op. cit.)

De acuerdo a la clasificación de la Tabla 37 y usando la metodología antes descrita se determinó que el nivel de madurez de la tecnología es **TRL 8**.

6.3.2.5 Costo de producción total y unitario de electricidad

Para la estimación de los costos de producción total y unitario de electricidad de una planta de gasificación de biomasa, se estima que el costo de los equipos está cerca de los 7.500 dólares por kW instalado (GAIA, op. cit.). En la Tabla 38 se muestran los posibles costos de producción de tres plantas de gasificación de biomasa, con tres potencias 10, 40 y 100 KW, cabe mencionar que entre más capacidad tenga la planta más grande será la inversión inicial sin embargo el costo unitario de electricidad será menor. En la metodología se exponen las distintas suposiciones y parámetros tomados para el cálculo de los diferentes costos, además en el Anexo E se puede ver más ampliamente el procedimiento realizado.

Tabla 38. Costos de producción total y unitario de electricidad planta de gasificación biomasa.

Ítem	Capacidad de generación (Kw de generación de energía)		
	10	40	100
Costos de operación totales (USD por año)	11836,000	22255,000	46563,000
Costos fijos totales (USD por año)	5130,000	20520,000	51300,000
Otros costos totales (USD por año)	4032,000	8187,000	15081,000
Costos totales de producción (USD por año)	20998,000	50962,000	112944,000
Costo de producción por kWh	1,007	0,611	0,542

Fuente: Elaboración propia a partir de (FAO, op. cit.)

6.3.3 COMBUSTIÓN

La combustión de un combustible se puede definir como la oxidación total del mismo para producir energía principalmente y algunos subproductos como dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). En el caso de la biomasa el proceso consta de varios pasos fundamentales: En primer lugar la biomasa debe ser secada, gran parte de los recursos biomásicos tienen un alto contenido de agua, entre mayor sea el contenido de agua más difícil resulta su aprovechamiento para la producción de energía. (Faaij, 2014)

La combustión de la biomasa es usada en un amplio margen de equipos para transformar la energía química almacenada en la biomasa en calor, energía mecánica o electricidad, tal como estufas, turbinas de vapor, turbo-generadores, etc. La combustión de la biomasa produce gases calientes a temperaturas entre los 800 – 1000 °C. Es posible quemar cualquier tipo de biomasa, sin embargo en la práctica la combustión es únicamente viable en biomasa con un contenido de humedad inferior al 50% a no ser que esta se someta a un proceso de secado antes de su combustión. Para biomasa con contenidos de humedad superiores es mucho mejor usar procesos de transformación bioquímicos. (McKendry, 2012)

La biomasa es una opción interesante para la producción de electricidad y calor en partes del mundo donde abundan los suministros de residuos de la agricultura o la industria de productos forestales. Sin embargo, el rápido desarrollo de las tecnologías de biocombustibles líquidos de segunda generación para producir combustibles para el transporte podría crear competencia por las materias primas entre los dos usos (IEA, 2009)

La combustión de biomasa ya proporciona alrededor del 12% de las necesidades energéticas mundiales, incluido el uso de la cocina tradicional y la calefacción. En 2006, las plantas de energía y calor basadas en biomasa consumieron un volumen de materia prima equivalente a 3.5 EJ, que representa solo el 7% de la biomasa mundial utilizada con fines energéticos, el consumo en los países de La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) representó el 82% de este volumen. (IEA, op. cit.)

En la actualidad, hay unas 230 plantas eléctricas y de calor y energía combinadas (cogeneración) utilizan combustible, principalmente en el norte de Europa y los Estados Unidos con unas capacidades entre los 50-700 MW. La combustión en las plantas de cogeneración es actualmente la opción más competitiva para explotar el potencial de energía de la biomasa tanto para la producción de electricidad como para la producción de calor. Las materias primas de biomasa incluyen los residuos forestales y agrícolas, el estiércol animal, los desechos y los cultivos energéticos dedicados. (Ídem)

6.3.3.1 Combustión directa

La combustión directa como su nombre lo indica es el proceso en el cual se hace una combustión de biomasa, este proceso maneja temperaturas entre los 800-1000°C, el agente oxidante en este caso es el aire, como es de suponerse esta en exceso para que todo el biocombustible reaccione.

Tipos de tecnologías para combustión directa

La tecnología más usada es la tradicional de parrilla, utilizándose tanto parrillas fijas, horizontales e inclinadas, como móviles y vibratorias, a veces refrigeradas con agua.

Las calderas de parrilla de biomasa no son diferentes en esencia a las utilizadas con otros combustibles sólidos, como el carbón, la única diferencia es que tienen pequeñas modificaciones de diseño ya que tiene que ser adaptarlas a las características específicas del nuevo combustible. La Figura 34 muestra una planta de combustión directa de biomasa en este caso paja la cual actúa como biocombustible en la caldera.

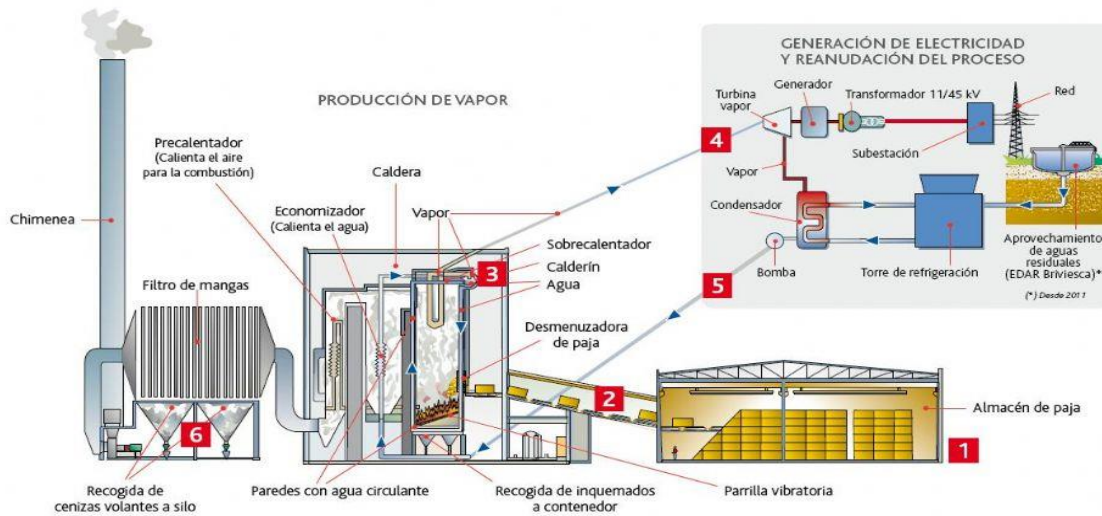


Figura 34. Planta de biomasa para la generación de energía eléctrica, mediante combustión directa.

Fuente: (Gónzales Gavilánez & Lucía Izabela, op. cit)

Para este proceso lo más ideal es que el grado de humedad sea inferior al 15% ya que el proceso de evaporación consumirá parte de la energía liberada en la combustión. La diferencia de eficiencia entre biomasa seca y la húmeda es de un 20%, más otros aspectos a tener en cuenta son la granulometría o tamaño y la densidad de la biomasa. Es su gran mayoría las tecnologías utilizadas para la combustión incluyen sistemas simples como hornos, estufas y calderas. (Ídem)

Además de la parrilla existen un amplio número de tecnologías dispuestas para la combustión directa de biomasa, en la Tabla 39 un resumen de las más importantes con sus ventajas, desventajas y aplicaciones comunes, de esta tabla podemos concluir que el uso de la combustión como una tecnología de transformación de biomasa es ampliamente aceptado para la generación de calor, sin embargo su potencial en la generación de energía eléctrica se reduce a plantas con un gran potencial de generación e inversión. (Arenas Castellanos, 2009)

Tabla 39. Tecnologías de combustión directa.

Tecnología de Combustión	Ventajas	Desventajas	Principales aplicaciones
Estufas y calderas de alimentación inferior	Bajo costo, control sencillo.	Alta calidad y cantidad en el suministro de combustible	Generación de calor, en algunos casos hasta 6MWh para comunidades.
Hornos de parrilla	Bajo costo de proceso, infraestructura resistente a la escoria.	Dificultad para usar mezclas de combustible. La combustión no es homogénea, generando emisiones indeseables.	Usual en la incineración de basuras. Se puede llegar a producir una potencia de hasta 20–30MWe.
Combustión de polvo (Dust combustion)	Alta eficiencia, buen control sobre la carga de biomasa, bajas emisiones de óxidos nitrosos.	Se requiere biomasa peletizada o en partículas diminutas. Se necesita el uso de revestimiento especial para el horno de combustión.	Su uso no es común salvo en instalaciones que tengan abundancia de biomasa en forma de aserrín o polvo.

Fuente: (Arenas Castellanos, op. cit.)

6.3.3.2 Capacidad de procesamiento combustión directa

La tecnología más difundida a escala comercial para llevar a cabo la combustión de la biomasa es la tradicional de parrilla, utilizándose tanto parrillas fijas, horizontales e inclinadas, como móviles y vibratorias.

La Tabla 40 muestra los tipos de hornos más usados para la combustión de biomasa, en ella podemos observar las distintas capacidades de esta tecnología, las cuales van desde los 1,5 MW hasta los 300 MW esto muestra la gran versatilidad que esta tecnología posee ya que se puede adaptar a los diferentes requisitos de potencia.

Tabla 40. Capacidades tecnologías de combustión de biomasa.

Operación	Tipo	Rango de Potencia	Combustible	% Ceniza	% Contenido de Agua
Automática	Hornos con el fogón abajo	20 kW – 2.5 MW	Astillas de madera, residuos de leña	< 2	5 – 50
	Hornos con parrilla móvil	150 kW – 15 MW	Todos combustibles de madera y la mayoría de biomasa	< 50	5 – 60
	Horno con parrilla	20 kW – 1,5 MW	Residuos de madera seca	< 5	5 – 35
	Hornos con el fogón abajo y parrilla rotatoria	2 – 5 MW	Astillas de madera, alto contenido de agua	< 50	40 – 65
	Quemador simple	3 – 5 MW	Fardos	< 5	20
	Lecho fluidizado estacionario	5 – 15 MW	Biomasa con diámetro < 10 mm	< 50	5 – 60
	Lecho fluidizado circulante	15 – 100 MW	Biomasa con diámetro < 10 mm	< 50	5 – 60
	Combustor de polvo con flujo entrante	5 – 10 MW	Biomasa con diámetro < 5 mm	< 5	20
Encendido con otros combustibles	Lecho fluidizado estacionario	50 – 150 MW	Biomasa con diámetro < 10 mm	< 50	5 – 60
	Lecho fluidizado circulante	100 – 300 MW	Biomasa con diámetro < 10 mm	< 50	5 – 60
	Quemador simple	5 – 20 MW	Fardos	< 5	20

Fuente: (Comisión Nacional de Energía, 2017)

La combustión de biomasa es la tecnología termoquímica más desarrolladas actualmente, debido a que tiene una gran ventaja frente a las demás y es que no necesita tecnologías de conversión sino que se puede diseñar una central termoeléctrica basada en la combustión directa de biomasa, para determinar la capacidad de una planta de combustión directa de biomasa se investigó sobre las distintas capacidades, basado en Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura se determinaron 10 KW, 40KW y 100KW.

Tabla 41. Especificaciones planta combustión directa de biomasa.

	Item			Unidad
Equipo	Combustión directa			
Cantidad biomasa	90	360	899	t
Potencia	10	40	100	KW

Fuente: Elaboración propia a partir de (Sanguino Barajas, Téllez Anaya, Escalante Hernández , & Vasquez Cardozo, op. cit.)

De la Tabla 41 se puede inferir que a comparación de las demás tecnologías termoquímicas la combustión directa es de las que menos cantidad de biomasa utiliza para la generación de energía.

Tabla 42. Eficiencia planta térmica de carbón y tonelada por KW del proceso de transformación de biomasa mediante combustión directa.

Humedad Biomasa	Tipo Biocombustible	Toneladas por 100 KW	Potencia Teórica (KW)	Tecnología de conversión	η_e (%)	KW por Tonelada
H < 50%	Biocarbon	1428	100	Planta térmica biocarbón	35 - 37	0,070

Fuente: Elaboración propia a partir de (Comunidad de Madrid, op. cit.)

En la Tabla 42 se observan la eficiencia de una planta térmica de carbón, cabe resaltar que para calcular la cantidad de biomasa necesaria para la producción de 1KW se tomaron datos del equipo de combustión más pequeño, además el porcentaje de eficiencia usado para los cálculos fue el mayor dentro del rango, con estos parámetros establecidos se determinó que para producir 1KW de energía eléctrica se necesita entre 0,070 toneladas de biomasa.

6.3.3.3 Vigilancia tecnológica de la combustión directa de biomasa

La búsqueda de patentes sobre combustión de biomasa se ha realizado en la base de datos <https://patentscope.wipo.int> considerando las invenciones patentadas desde el año 2008 hasta diciembre de 2016.

El análisis de los resultados obtenidos muestra que los países con mayor interés en el tema son China (6829), Estados Unidos (1191) y Japón (1105) (Figura #). La región asiática se encuentra a la cabeza de esta línea de investigación, pues el número de patentes asiáticas supone casi el 65% del total sin embargo Estados Unidos acumula un 9% siendo el país no asiático con más porcentaje en el mundo. Por su parte, Colombia cuenta con (11) patentes, lo cual es la media de la región latinoamericana, para dicho análisis las patentes del Tratado de Cooperación en materia de Patentes (PTC) y European Patent Office no se contaron como país debido a que son tratados encargados de conseguir patentes nacionales en todos

los países firmantes de dicho tratado.

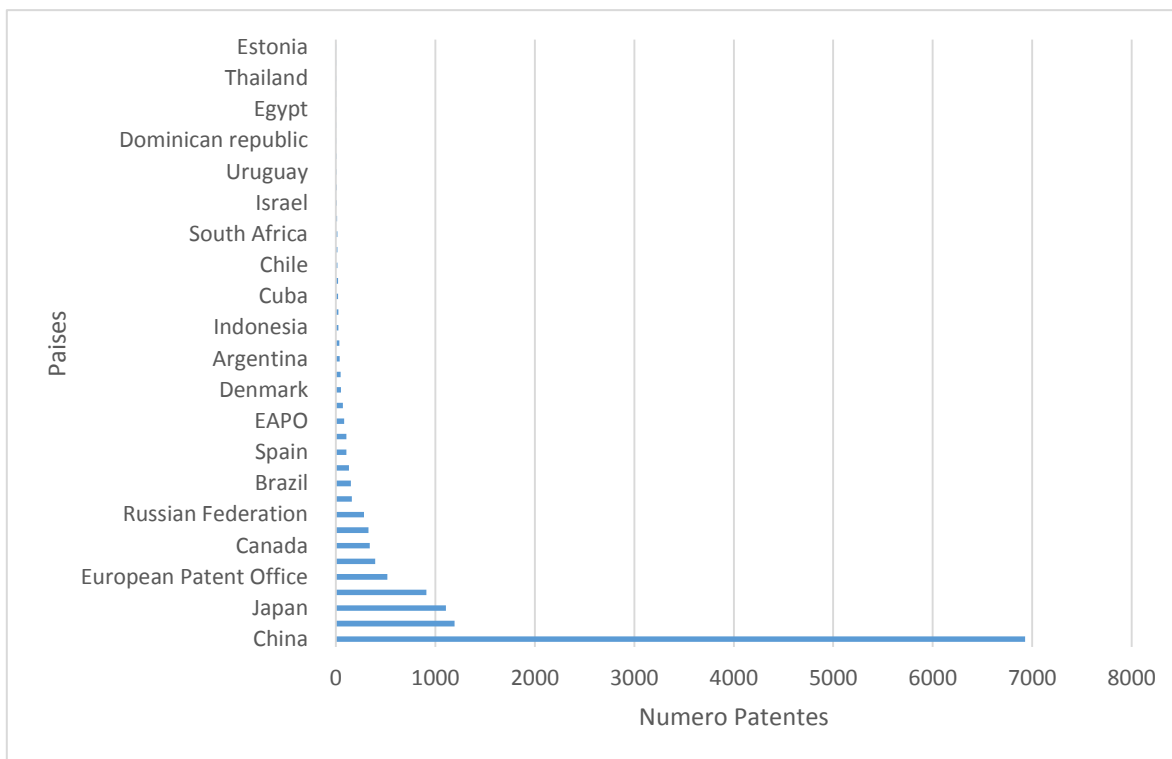


Figura 35. Distribución de patentes sobre combustión directa de biomasa por países.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Patentscope.wipo.int. op. cit.)

La evolución de la investigación sobre combustión de biomasa se ve reflejada en función del número de invenciones patentadas durante los últimos 9 años a nivel mundial, se muestra en la Figura 36 un aumento bastante rápido y progresivo en el número de patentes hasta el año 2016. En nueve años el aumento en patentes relacionadas con este tema es aproximadamente de un 330%.

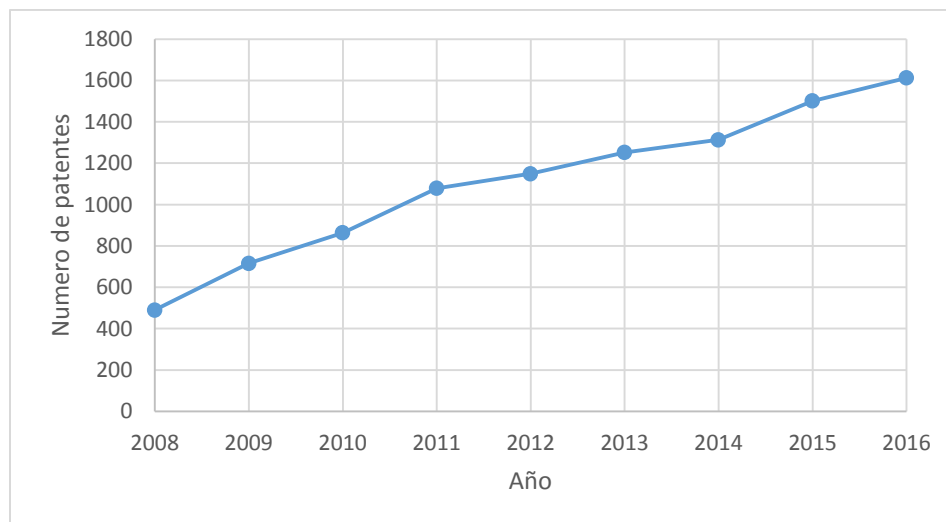


Figura 36. Variación de patentes sobre combustión directa de biomasa por años.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ídem)

6.3.3.4 Nivel de madurez

Para determinar el nivel de madurez de la tecnología de transformación de biomasa mediante combustión directa se establecieron tres criterios fundamentales como son: entorno tipo de investigación, desarrollo tecnológico e innovación y por ultimo su aplicación práctica, el criterio de menor nivel va hacer el que determine dicho nivel. En la Tabla 43. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante combustión directa de biomasa. Se discriminan las condiciones de cada una de ellas.

Tabla 43. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante combustión directa de biomasa.

Nivel	Descripcion	Justificacion
TRL 9	Entorno real	La tecnología se encuentra en un entorno real debido a que ya se encuentra comercialmente.
TRL 9	Innovación	La tecnología es innovadora ya que es un nuevo producto introducido en el mercado.
TRL 9	Despliegue	La tecnología presenta una comercialización de alto despliegue.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Unión Europea, op. cit.)

De acuerdo a la clasificación de la Tabla 43 y usando la metodología antes descrita se determinó que el nivel de madurez de la tecnología es **TRL 9**.

6.3.3.5 Costo de producción total y unitario de electricidad

Para la estimación de los costos de producción total y unitario de electricidad de una planta combustión directa de biomasa, se estima que el costo de los equipos está cerca de los 7.000 dólares por kW instalado (GAIA, op. cit.). En la Tabla 44 se muestran los posibles costos de producción de tres planta combustión directa de biomasa, con tres potencias 10, 40 y 100 KW, cabe mencionar que entre más capacidad tenga la planta más grande será la inversión inicial sin embargo el costo unitario de electricidad será menor. En la metodología se exponen las distintas suposiciones y parámetros tomados para el cálculo de los diferentes costos, además en el Anexo F se puede ver más ampliamente el procedimiento realizado.

Tabla 44. Costos de producción total y unitario de electricidad planta combustión directa de biomasa.

Ítem	Capacidad de generación (Kw de generación de energía)		
	10	40	100
Costos de operación totales (USD por año)	11836,000	22255,000	46563,000
Costos fijos totales (USD por año)	4788,000	19152,000	47880,000
Otros costos totales (USD por año)	4032,000	8187,000	15081,000
Costos totales de producción (USD por año)	20656,000	49594,000	109524,000
Costo de producción por kWh	0,991	0,595	0,525

Fuente: Elaboración propia a partir de (FAO, op. cit.)

6.3.4 LICUEFACCIÓN

Es un proceso de transformación de biomasa, a baja temperatura y presiones elevadas de hidrógeno, en hidrocarburos líquidos y estables. Hoy en día el interés por la licuefacción es bajo debido a que los reactores y sistemas de alimentación de combustibles son muy complejos y económicamente menos rentables que los procesos de pirólisis. En la Figura 37 se observa un esquema en donde se muestran los procesos necesarios para realizar el proceso de licuefacción, se destaca que es necesario hacer dos procesos de filtración, además se ven los posibles productos de dicho proceso.

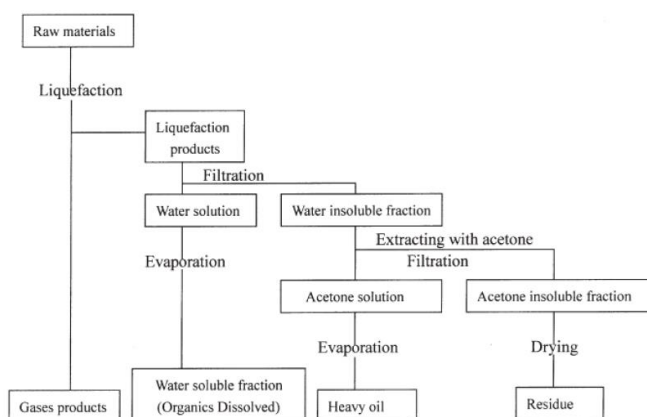


Figura 37. Procesos en la licuefacción de biomasa.

Fuente: (Fernández M. , 2008)

Por otro lado, la licuefacción hidrotérmica implica convertir la biomasa en un líquido aceitoso por contacto de la biomasa con agua a elevadas temperaturas (300-350 °C) con suficiente presión para mantener el agua en fase líquida (12-20 MPa) y tiempos de residencia por encima de 30 minutos.

En la licuefacción la biomasa es descompuesta en moléculas pequeñas en agua con o sin disolvente o catalizador. Estas moléculas pequeñas son inestables y reactivas y pueden re-polimerizar a los componentes aceitosos con un extenso rango de distribución de pesos moleculares. La licuefacción de biomasa ha sido investigada en presencia de soluciones de álcalis, formiatos de metales alcalinos,

propanol, butanol y glicerina, o licuefacción directa. (Gollakota, Kishore, & Gu, 2018)

La investigación sobre licuefacción de biomasa puede remontarse a la década de 1930, en la actualidad hay una considerable cantidad de literatura y estudios disponibles en todo el mundo sobre la biomasa húmeda y su posible transformación en biocombustible mediante licuefacción. Desde 2009, el estudio de esta tecnología ha crecido gradualmente llamando la atención de algunos reputados laboratorios internacionales de investigación que exploran los parámetros de la reacción de licuefacción que incluye el tiempo de residencia, temperatura de reacción, selección del catalizador y carga, proporcionando una descripción completa sobre la licuefacción de biomasa utilizando agua sub y supercrítica o técnica de extracción solvente. Además, los productos del proceso licuefacción comprende una amplia gama de compuestos químicos de valor añadido que incluir compuestos alifáticos ramificados, aromáticos y derivados fenólicos, ácidos carboxílicos, ésteres y estructuras de anillo nitrogenado. (Ídem)

La licuefacción en este momento se encuentra en un estado transitorio de la escala piloto de laboratorio a la escala piloto-industrial, que hace que los mecanismos de estudio sean más importantes y urgentes. Con el apoyo de los mecanismos de trabajo, el desarrollo de unidades de gran escala podría ser productos más razonables y de alta calidad pueden ser producidos, dando solución a algunos problemas ambientales y energéticos actuales. Recientemente, la inmensa cantidad de trabajo relacionado con la licuefacción de biomasa húmeda y seca a través de diferentes técnicas ha llevado a cabo por muchos investigadores. (Ídem)

6.3.4.1 Vigilancia tecnológica de la licuefacción de biomasa

La búsqueda de patentes sobre combustión de biomasa se ha realizado en la base de datos <https://patentscope.wipo.int> considerando las invenciones patentadas desde el año 2008 hasta diciembre de 2016.

El análisis de los resultados obtenidos muestra que los países con mayor interés en el tema son China (323), Rusia (301) y Japón (80) Figura 38. La región asiática se encuentra a la cabeza de esta línea de investigación, pues el número de patentes asiáticas supone casi el 45% del total sin embargo Rusia acumula un 33% siendo el país no asiático con más porcentaje en el mundo, y estando cerca de china que es el país con más patentes en el mundo con un 35%. Por su parte, Colombia no cuenta con ninguna patente registrada, concordando con la media en la región latinoamericana exceptuando México, Argentina y Brasil, para dicho análisis las patentes del Tratado de Cooperación en materia de Patentes (PTC) y European Patent Office no se contaron como país debido a que son tratados encargados de conseguir patentes nacionales en todos los países firmantes de dicho tratado.

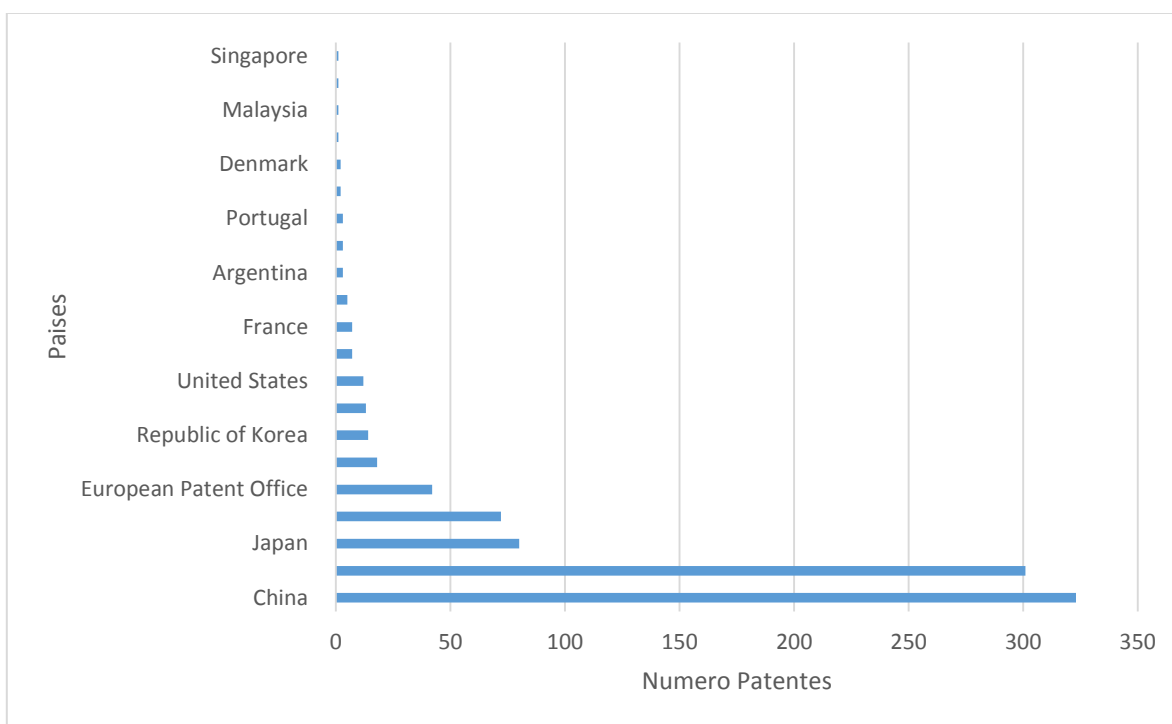


Figura 38. Distribución de patentes sobre licuefacción de biomasa.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Patentscope.wipo.int. op. cit.)

La evolución de la investigación sobre licuefacción de biomasa se ve reflejada en función del número de invenciones patentadas durante los últimos 9 años a nivel mundial, se muestra en la Figura 39 un aumento bastante rápido y progresivo en

el número de patentes hasta el año 2016. En nueve años el aumento en patentes relacionadas con este tema es aproximadamente de un 242%. Si embargo el bajo número de patentes refleja el estado de la tecnología.

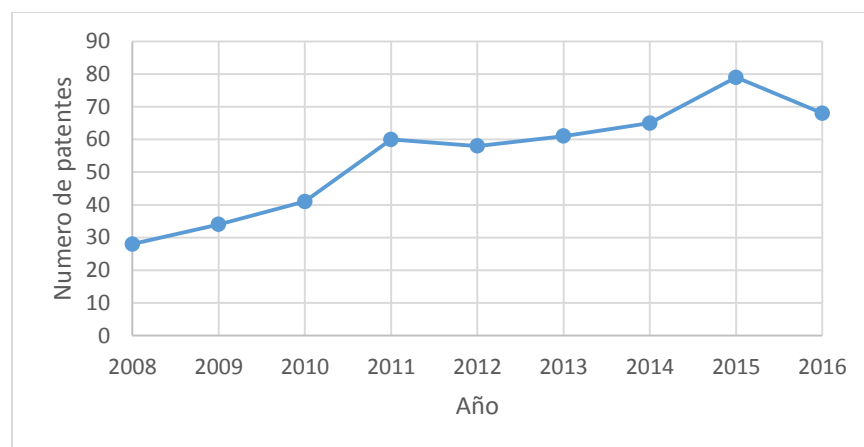


Figura 39. Variación de patentes sobre licuefacción de biomasa por años.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ídem)

6.3.4.2 Capacidad de procesamiento licuefacción

Como se mencionó anteriormente la licuefacción de biomasa está en etapa piloto por lo que no se puede determinar la verdadera capacidad de esta tecnología, sin embargo en la actualidad se están creando plantas piloto para la generación de biocombustible.

Este tipo de plantas producen biocombustible a partir de diferentes leñosas y algunas algas tipo acuático, que se utilizan para la sustitución del petróleo crudo, estos procesos someten la biomasa húmeda a temperaturas elevadas (250-350 ° C) y presiones de (10-20 MPa) con el fin de descomponer y reformar los bloques de construcción químicos en el aceite bio-crudo, este tiene un poder energético cerca de (30-40 MJ / kg), dependiendo de la materia prima utilizada, esto hace que sea apto la generación de energía eléctrica. Además las robustas condiciones de reacción hacen que la licuefacción sea muy adecuada para la conversión, algas que proliferan en las aguas residuales y cuyo crecimiento se bastante rápido.

En la actualidad las plantas pequeñas de licuefacción no son rentables por lo que estos biocombustibles son usados como aditivos a los combustibles fósiles, la producción de este tipo de plantas es alrededor de los 5000 barriles al día producidos a un precio de 1,74 dólares el galón, en un futuro se espera mejorar y llegar a tener producciones de 100000 barriles al día a un precio de 1 dólar el galón. (Tecnologías de biocombustibles Enterprises Inc, 2018)

El modelo de bio-refinería permitiría aumentar y mejorar las refinerías de petróleo existentes, ofreciendo una transición suave desde el petróleo crudo fósil a biocrudo aceite que puede en un futuro ser económico, más limpio. Estos combustibles pueden ser puestos a disposición del público en general a precios muy económicos al mismo tiempo darse cuenta de ganancias sustanciales por galón de producto vendido.

6.3.4.3 Nivel de madurez

El nivel de madurez de la tecnología licuefacción de biomasa de acuerdo a la clasificación descrita en la metodología antes descrita es TRL 4 debido a que esta tecnología se encuentra un en una etapa de investigación, al estar en esta etapa quiere decir que está en un entorno de laboratorio además que hoy en día el producto no se encuentra en un grado de comerciabilidad sino al contrario, está en una fase de prototipo o de demostración.

Tabla 45. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante licuefacción.

Nivel	Descripcion	Justificacion
TRL 6	Entorno simulación	La tecnología se encuentra en un entorno de simulación ya se encuentra en pruebas para su lanzamiento al mercado.
TRL 6	Desarrollo	La tecnología se encuentra en desarrollo para ser lanzada al mercado.
TRL 7	Prototipo/ Demostrador Desarrollo tecnológico	La tecnología no está a un nivel más alto gracias a que no presenta una comercialización.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Unión Europea, op. cit.)

De acuerdo a la clasificación de la Tabla 45 y usando la metodología antes descrita se determinó que el nivel de madurez de la tecnología es **TRL 6**.

6.3.4.4 Costo de producción total y unitario de electricidad

Ya que la tecnología está en etapa de desarrollo, y prototipo, no es posible hacer una estimación de los costos asociados a la generación eléctrica a partir del proceso de licuefacción de biomasa.

6.3.5 HIDROTRATAMIENTO

Entre la biomasa residual, como se ha visto, existen varios factores en sus composiciones físicas y químicas, lo que hace que se requieran de diversas tecnologías para cubrir el amplio espectro de características que la biomasa presenta; entre la biomasa residual pecuaria y forestal encontramos a las diferentes grasas y aceites que forman parte de la misma, tanto de origen animal como vegetal, y de la cual mediante un proceso llamado hidrotratamiento es posible obtener combustibles líquidos que comúnmente se les conoce como: biogasoil, greendiesel, y diésel renovable, y que se presenta como una alternativa de mejor calidad a la del biodiesel tradicional.

El hidrotratamiento es un proceso consistente en el sometimiento de un material a alta temperatura y presión de hidrógeno en presencia de un catalizador adecuado; Este proceso ha cobrado creciente interés en el área de las energías renovables ya que hace posible convertir a biocombustibles biomasa de diferente origen. En particular, cuando una grasa o aceite es destinado a este tipo de proceso es posible su conversión a una mezcla de parafinas e isoparafinas aptas para la sustitución del gasoil (Volonterio, 2017); Mediante este tipo de proceso es posible la remoción total del oxígeno de los triacilgliceroles para obtener una mezcla de parafinas e isoparafinas de punto de ebullición similar al del gasoil y propano como subproducto (Hancsók, 2007), En la figura 40 se muestra de manera sencilla el proceso de hidroprocesamiento en el cultivo de semillas:

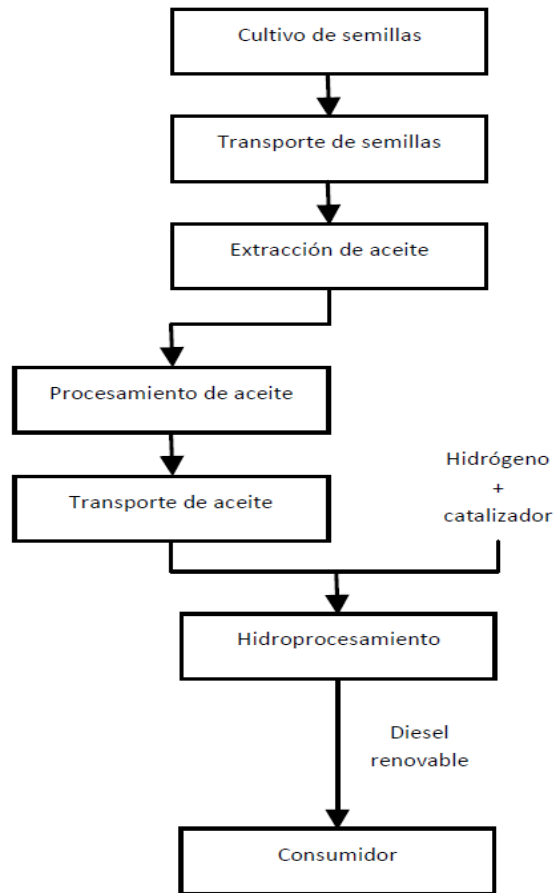


Figura 40. Proceso de hidrotreatmento para semillas.

Fuente: (Romero, 2011)

El hidrotreatmento es una opción efectiva para cumplir con las legislaciones ambientales estrictas en la disminución de contaminantes a la atmosfera, así como gases y partículas sólidas. Entre los principales compuestos que se desean eliminar de las cargas son los sulfuros, nitrógeno, oxígeno, metales y compuestos aromáticos; adicionalmente debido a que una gran parte del oxígeno que originalmente está presente en el aceite se remueve durante su procesamiento, el poder calorífico del diésel renovable resulta ser similar al del diésel de petróleo (Ídem)

6.3.5.1 Vigilancia tecnológica del hidrotreatmento de biomasa

Los datos obtenidos en la búsqueda de patentes para hidrotreatmento de biomasa en el portal World intellectual property organization (WIPO), se muestran en las siguientes figuras, las mismas comprenden la producción de patentes en el periodo 2008-2017, y la lista de países productores de las mismas.

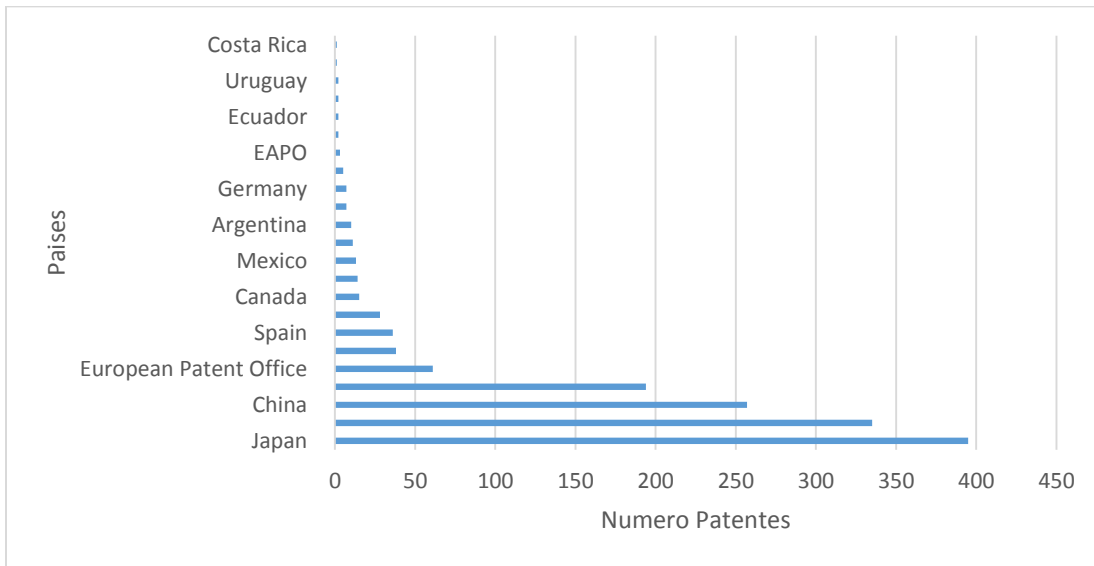


Figura 41. Distribución de patentes sobre hidrotreatmento de biomasa por países.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Patentscope.wipo.int, op. cit.)

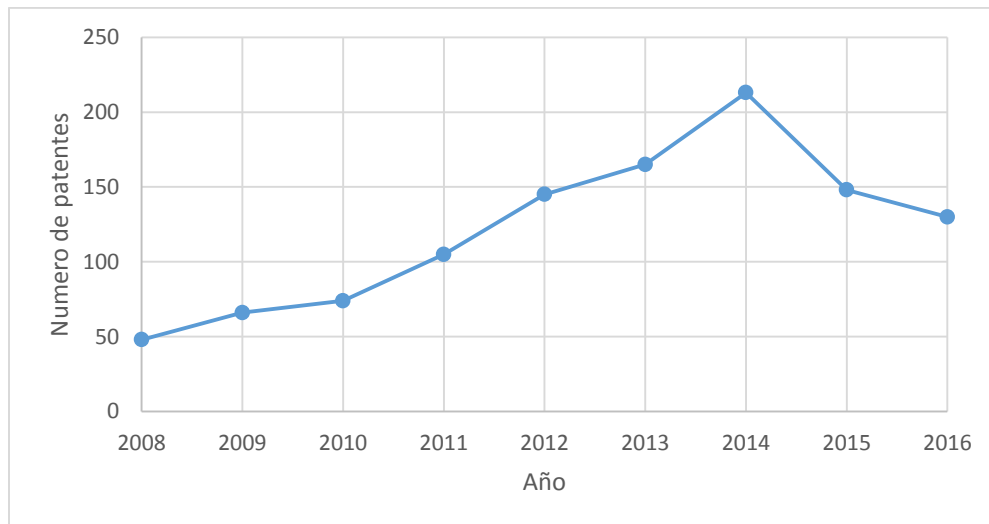


Figura 42. Variación de patentes sobre hidrotreatmento de biomasa por años.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ídem)

Con los datos obtenidos se observa que esta tecnología no tiene un número elevado de patentes, con respecto a las otras tecnologías abordadas; sin embargo se puede evidenciar que el sector asiático domina la producción de patentes con cerca del 45% del total, el referente latinoamericano es México con un total de 38 patentes, lo que lo ubica en el sexto lugar; entre tanto Colombia ocupa el puesto 16 de la lista con un total de 8 patentes. El crecimiento del número de las patentes es sostenido a lo largo del periodo evaluado, pese a esto el número de las mismas es bajo, lo que representaría que la misma está en una etapa de pruebas y desarrollo.

6.3.5.1 Capacidad de procesamiento hidrotratamiento.

Esta tecnología de procesamiento de la biomasa, como se mencionó anteriormente hace uso generalmente de biomasa residual, proveniente de las grasas y aceites, tanto animales como vegetales, para elaborar el Green diésel, por lo tanto la oferta de este tipo de biomasa es de interés en el tema; la Tabla 46 relaciona los principales países productores de grasas y aceites en el mundo en el año 2015 además de la estimación de producción en 2016:

Tabla 46. Países productores de grasas y aceites (en miles de toneladas)

Rank	Producto	2014/2015 (oct/set) 000 t	2015/2016e (oct/set) 000 t	Variación
1°	Indonesia	37.664	37.991	0,9%
2°	China	26.484	27.112	2,4%
3°	Unión Europea (UE28)	23.960	23.925	-0,1%
4°	Malasia	22.300	22.264	-0,2%
5°	EE.UU.	17.604	17.993	2,2%
6°	Brasil	10.241	10.531	2,8%
7°	Argentina	9.259	10.203	10,2%
8°	India	8.540	8.298	-2,8%
	Otros	47.812	48.740	1,9%
Total mundial		203.864	207.057	1,6%

Fuente: OIL World, diciembre 2015 (incluye aceites de palma, soja, algodón, maní, girasol, colza, sesamo, maíz, oliva, almendra de palma, coca, manteca, grasas, aceite de pescado, lino, castor, sebas y grasas). e=Estimado.

Fuente: (Rosario, 2016)

En materia de producción de biocombustibles por medio del proceso de hidrotratamiento, tenemos que es el tercer biocombustible en volumen producido a nivel mundial y su producción está creciendo a un ritmo más rápido que el de las más maduras industrias del bioetanol y del biodiesel. Por ello, muchas empresas han desarrollado tecnologías patentadas para obtener este tipo de biocombustible. Además, debe tenerse en cuenta que es posible transformar refinerías existentes en biorrefinerías de HVO con inversiones relativamente bajas, la Tabla 47 relaciona las plantas que refinan actualmente por medio de este proceso y las que están en planificación o construcción:

Tabla 47. Plantas productoras de biocombustibles por hidrotratamiento.

EN OPERACIÓN					
Emplazamiento	Propietario	Materias primas	Tecnología	Capacidad	Puesta en marcha
Kilpilahti, Porvoo (Finland)	Neste	Vegetable oil and waste animal fat	NEXBTL technology (developed by Neste)	2 unidades de 190.000 toneladas al año	1ª unidad: 2007. 2ª unidad: 2009.
Tuas Industrial Area, Singapur (Singapur)	Neste	Aceites vegetales y grasas animales residuales	Tecnología NEXBTL (desarrollada por Neste)	1 millón de toneladas al año	2010
Geismar, Louisiana (USA)	Renewable Energy Group (REG) Inc.	Materias primas con ácidos grasos libres	Desarrollada por Dynamic Fuels LLC (JV formado por Syntroleum y Tyson Foods)	250.000 toneladas al año	2010. Dynamic Fuels LLC abrió la planta en 2010 y REG adquirió la instalación en 2014
Rotterdam (Holanda) – Entrada	Neste	Aceites vegetales y grasas animales residuales	Tecnología NEXBTL (desarrollada por Neste)	1 millón de toneladas al año	2011
Norco, Louisiana (USA)	Diamond Green Diesel	Una mezcla de aceites vegetales no comestibles y grasas animales	Tecnología Ecofining™ (desarrollada por eni y UOP)	500.000 toneladas al año. Ampliación a 900.000 toneladas que será finalizada en 2Q 2018.	2013
Porto Marghera, Venecia (Italia) – Entrada	eni	Aceites vegetales, grasas animales y aceite de cocina usado	Tecnología Ecofining™ (desarrollada por eni y UOP)	1ª fase: 360.000 toneladas al año (ahora en operación). 2ª fase: 420.000 toneladas al año (se espera en 2017).	Junio 2014. Transformación de las unidades de HDS de la refinería existente
Lappeenranta (Finlandia) – Entrada	UPM Biofuels	Tall-oil crudo	UPM BioVerno (desarrollado por UPM Biofuels)	100.000 toneladas al año	Enero 2015
Paramount, California (USA)	AltAir Fuels	Aceites naturales no alimentarias y residuos agrícolas	Tecnología Ecofining™ (desarrollada por eni y UOP)	130.000 toneladas al año	Principios de 2016
NOTAS: 1. Petrobras (Brasil) y Sinopec (China) se supone que producen HVO pero no fue posible encontrar información viable. 2. También, hay bastantes empresas que co-procesan aceites vegetales y combustibles fósiles. - Cepsa: Varias refinerías en España. - Preem: Suecia. - Repsol: Varias refinerías en España.					

EN PLANIFICACIÓN O EN CONSTRUCCIÓN				
Emplazamiento	Propietario	Tecnología	Capacidad	Puesta en marcha
Plaquemine, Louisiana (USA)	Emerald Biofuels	Tecnología Ecofining™ (desarrollada por eni y UOP)	280.000 tons/año	Los planes de construcción fueron anunciados en 2012 pero su fecha de finalización no se conoce todavía
Fujairah (UAE)	Petrixo	Tecnología Ecofining™ (desarrollada por eni y UOP)	250.000 tons/año	En 2015, se anunció que la fecha esperada de puesta en marcha era 2017 pero parece que los trabajos todavía no se han iniciado
Sines (Portugal)	Galp	Co-procesado.	40.000 tons/año	En construcción. Se espera la puesta en marcha para 2017.
La Mède (Francia)	Total	Tecnología Vegan™ (desarrollado por IFP Energies nouvelles y comercializado por Axens)	500.000 tons/año	En construcción. Se espera la puesta en marcha para 2018.
Gela (Italia)	eni	Tecnología Ecofining™ (desarrollada por eni y UOP)	-	En construcción. Se espera la puesta en marcha para 2018.

Fuente: (Morán, 2016)

A pesar de que ya existen biorefinerías que producen este biocombustible, aún no existen plantas que generen electricidad a partir del mismo, ya que esta tecnología para esta aplicación, se encuentra en fase de desarrollo de conceptos y prototipo; adicionalmente el biocombustible generado por este proceso, es de muy buena calidad y su uso intensivo se está experimentando como combustible para aviones, en la fabricación de bionaftas y biopropano, la Figura 43 muestra los diferentes procesos que puede experimentar la biomasa para la generación de combustibles aeronáuticos a partir del hidrotreamiento:

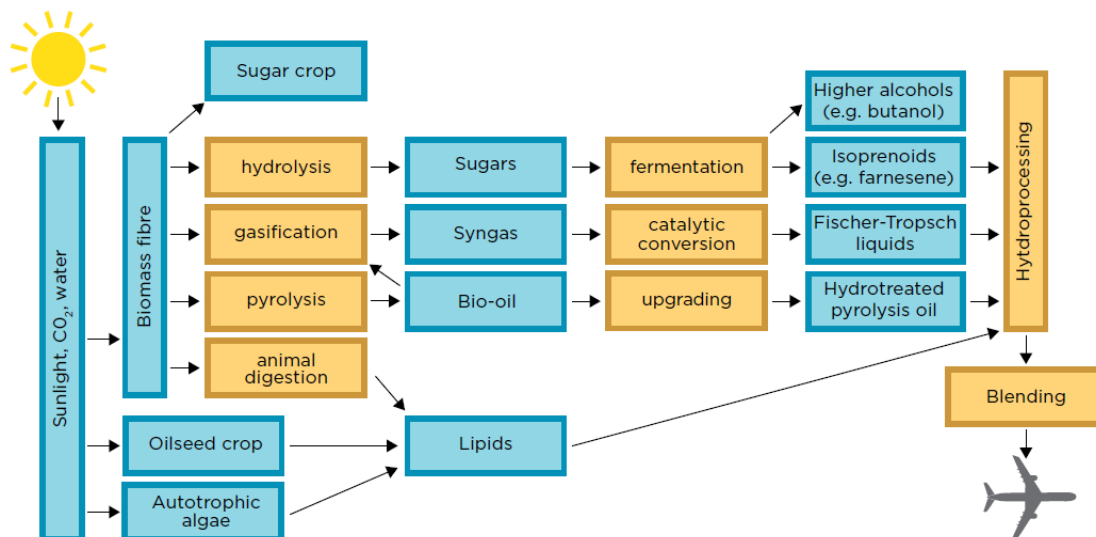


Figura 43. Esquema proceso de hidrotreamiento de biomasa para combustibles aeronáuticos.

Fuente: (IRENA, 2017)

6.3.5.2 Nivel de madurez

Para determinar el nivel de madurez de la tecnología de transformación de biomasa mediante digestión hidrot ratamiento se establecieron tres criterios fundamentales como son: entorno, tipo de investigación- desarrollo tecnológico e innovación y su aplicación práctica, el criterio de menor nivel entre los 3 mencionados, va hacer el que determine el nivel de madurez de la tecnología. En la Tabla 48, se discriminan las condiciones de cada una de ellas.

Tabla 48. Nivel de madurez tecnología de transformación de biomasa mediante hidrot ratamiento.

Nivel	Descripcion	Justificacion
TRL 3	Entorno de laboratorio	La tecnología se encuentra en un entorno de laboratorio.
TRL 4	Investigación	La tecnología está en fase investigativa enfocada principalmente a la producción de combustible para transporte.
TRL 3	Investigación industrial	La tecnología está en etapa investigación industrial, para su consolidación en biorefinerías de HVO.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Unión Europea, op. cit.)

De acuerdo a la clasificación de la Tabla 48 y usando la metodología antes descrita se determinó que le nivel de madurez de la tecnología es **TRL 3**.

6.3.5.3 Costos de producción total y unitario de electricidad

Ya que la tecnología está en etapa de laboratorio, y en fase de investigación, no es posible hacer una estimación de los costos asociados a la generación eléctrica a partir del proceso de hidrot ratamiento de biomasa.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 Nivel de madurez de las tecnologías de transformación de biomasa.

Los resultados del nivel de madurez de acuerdo con la metodología TRL, de las tecnologías de transformación de biomasa en energía eléctrica, se resumen en la Tabla 49 esta clasifica las ocho tecnologías estudiadas según su nivel de madurez.

Tabla 49. Nivel de madurez de las tecnologías estudiadas.

TRL								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Investigación			Prototipo		Demostración		Etapa comercial	
							Mecánica	
								Biodigestión
						Fermentación		
							Pirólisis	
							Gasificación	
								Combustión
					Licuefacción			
		Hidrotratamiento						

Tabla 50. Nivel de madurez de las tecnologías estudiadas.

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 50, las tecnologías de biodigestion y la combustión son las de mayor nivel de madurez tecnológica con una valoración de TRL 9, ya que las mismas se encuentran certificadas a través de pruebas en entornos reales y se hallan en fase comercial; entre tanto las tecnologías de pellets, pirolisis y gasificación cuentan con una clasificación TLR 8, puesto que las mismas han sido probadas con éxito en entornos reales, pero hasta ahora inician su etapa comercial, de estas tecnologías se espera compitan en el ámbito energético en futuro cercano con las tecnologías ya establecidas como la biodigestion y la combustión.

Las tecnologías de la fermentación alcohólica (TLR 7) y la licuefacción (TLR6), se encuentran en etapa de demostración, ya que los prototipos que se están desarrollando con miras al aprovechamiento energético a partir de estas tecnologías están siendo probados en entornos reales y de simulación, por lo tanto estas tecnologías aún no se encuentran comercialmente. Finalmente el proceso de hidrot ratamiento (TLR 3), se encuentra en fase de investigación desde la parte de pruebas de concepto, por lo tanto esta tecnología no se encuentra disponible comercialmente para la generación eléctrica. Hay que anotar que el biocombustible derivado de esta tecnología se está experimentando para su uso intensivo como combustible de transporte, por lo tanto su aplicación en la generación energía eléctrica aun es distante.

7.2 Capacidades de procesamiento de las tecnologías de transformación de biomasa

Las capacidades determinadas para las tecnologías de transformación de biomasa residual en energía eléctrica se resumen en la Figura 44 estas se calcularon de acuerdo a la metodología antes expuesta, para las tecnologías de licuefacción e hidrot ratamiento no fue posible determinar dichas capacidades ya que no fue posible conseguir dicha información.

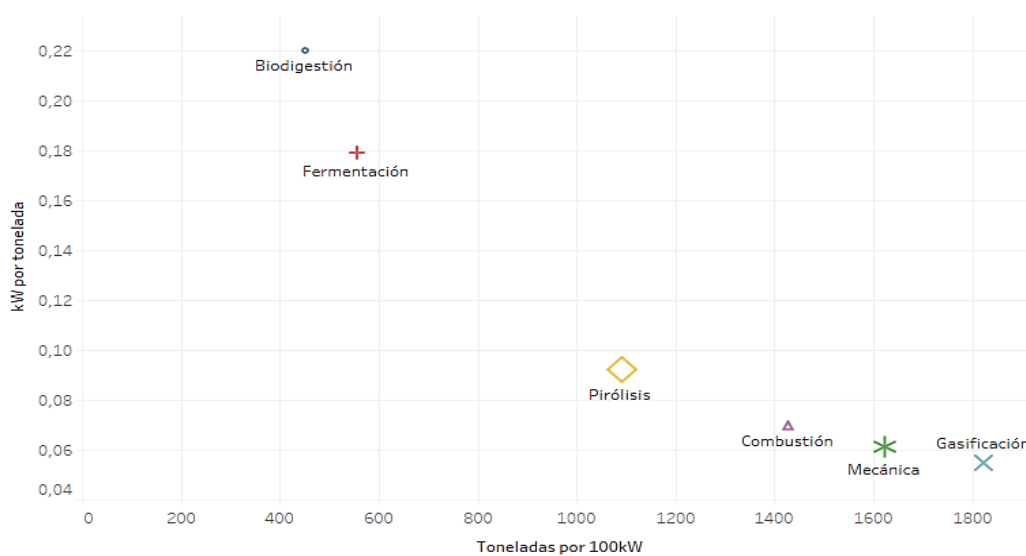


Figura 44. kW por tonelada biomasa vs toneladas biomasa por 100kW

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 44 se observa que la tecnología que necesita menos toneladas de biomasa para generar 100KW es la biodigestión, seguida por la fermentación, siendo las tecnologías bio-químicas la mejores en este aspecto, en contra parte las tecnologías termoquímicas necesitan de un poco más de biomasa, la pirólisis sin embargo se destaca ya que es la mejor de este grupo de tecnologías, la combustión está en medio entre la gasificación la pirólisis, sin embargo la que más consume biomasa de las tecnologías termoquímicas es la gasificación, por otra parte se observa que la tecnología mecánica es la antepenúltima en consumo de biomasa.

7.3 Costos de producción total y unitario de electricidad de las tecnologías de transformación de biomasa

Los resultados los costos de producción total y unitario de electricidad de las tecnologías de transformación de biomasa en energía eléctrica en Colombia se muestran en la en la Figura 45

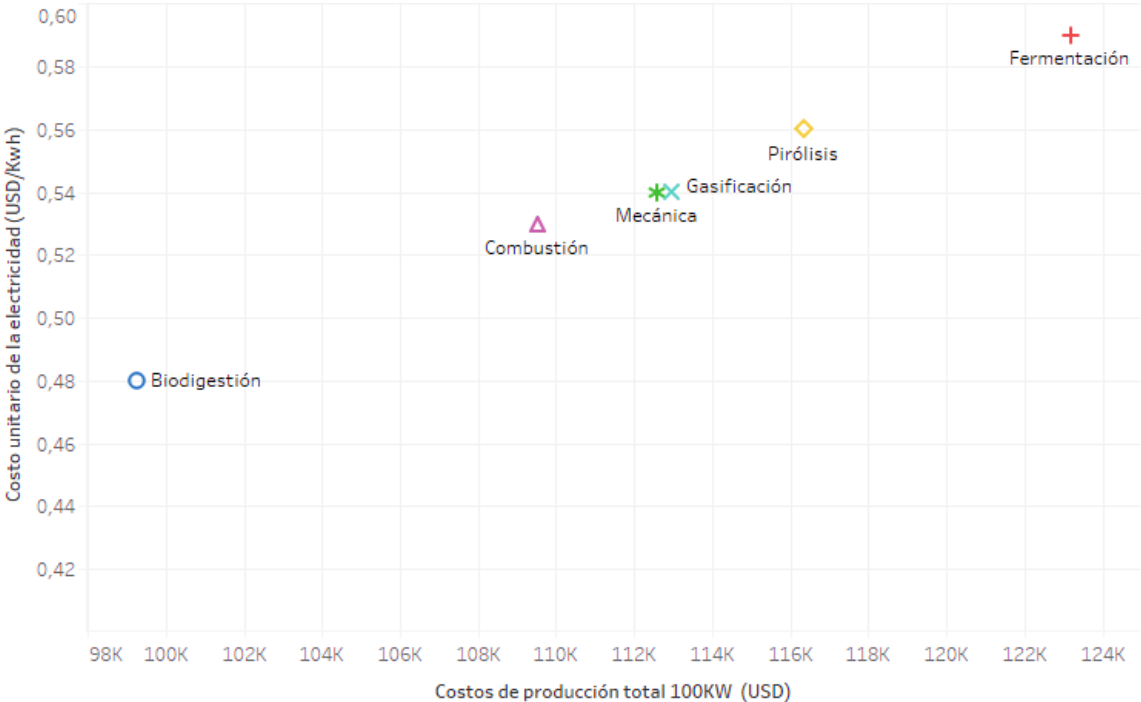


Figura 45. Costo de producción total y unitario de electricidad de las tecnologías de transformación de biomasa.

De la Figura 45 se puede observar que el costo de producción de energía eléctrica de la tecnología de fermentación de biomasa es bastante elevado siendo la tecnología más costosa incluso si se compara con la pirolisis que es la segunda más cara después de la fermentación, en el grupo de tecnologías termoquímicas la que tiene menor costo de producción es la combustión, siendo la gasificación la más equilibrada en ese aspecto, por su parte la tecnología mecánica tiene un costo de producción bastante similar a la gasificación sin embargo esta es mínimamente más barata, para terminar la tecnología que tiene un menor costo con respecto a las demás es la biodigestión ya que su costo de producción es considerablemente menor a todas las anteriores y aventaja en este aspecto a la combustión que es la segunda más barata.

8. CONCLUSIONES

- Se estableció el nivel de madurez tecnológica de las ocho tecnologías (proceso 1 Figura 5- pág. 24) estudiadas para la transformación de biomasa residual en energía eléctrica, los resultados obtenidos permiten hacer una aproximación del estado actual en relación con los ámbitos de investigación, desarrollo e innovación de cada tecnología, se evidencia que de las ocho tecnologías abordadas cinco se encuentran desarrolladas hasta la fase comercial (Mecánicas(pellets), Biodigestión, Pirolisis, Gasificación y Combustión), entre tanto dos tecnologías (Fermentación y licuefacción), se encuentran en proceso de demostración y la última (Hidrotratamiento) se encuentra en fase de investigación y prueba de conceptos.
- Se logró determinar la capacidad de procesamiento de las tecnologías de transformación de biomasa residual abordadas, relacionando la energía eléctrica generada por tonelada de biomasa residual (proceso 2 Figura 5- pag 24); los resultados revelan que las tecnologías de la biodigestion y la fermentación alcohólica presentan las más altas relaciones de energía generada por tonelada de biomasa (0.22 y 0.18 kW/ton respectivamente), entre tanto las tecnologías de pirolisis, combustión, gasificación y mecánicas presentan rendimientos más bajos, en el rango de 0.055 y 0.092 kW por tonelada con respecto a las anteriores tecnologías.
- Se estimaron los costos de producción totales(USD) y unitario(USD/KW/h) (tanto de la adquisición como de operación en cada una de las tecnologías estudiadas), que se encuentran en nivel comercial, para la generación de electricidad en Colombia; este análisis se hizo para centrales de generación de 10, 40 y 100 kW; los resultados encontrados permiten comparar los costos energéticos asociados a las tecnologías estudiadas bajo un mismo criterio; obteniendo que, para el costo unitario de electricidad (USD/KWh), la tecnología de la fermentación presenta el costo más alto (0.59 USD/KWh), entre tanto los procesos de pirolisis, gasificación, mecánicas (pellets), y combustión se encuentran en el rango de 0.51 a 0.56 USD/KWh, finalmente la biodigestion es la tecnología menos costosa (0.48 USD/KWh);

los costos calculados se dan en Dólares, debido a esto, hay que aclarar que en el presente trabajo no se tuvieron en cuenta costos asociados a importaciones e impuestos.

Bibliografía

- Abassi, T. &. (2012). Biogas Energy. En A. T. Springer.
- AEBION. (2017). *AEBION Statistical report*. Bruselas.
- Aldunate, J. (2015). *Plan de negocios para una fábrica de pellets en Chile* .
Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Arboleda, Y. (2009). *Fundamentos para diseño de biodigestores* . Palmira.
- Arenas Castellanos, D. (2009). *Propuesta de diseño de un proceso para la generación de energía eléctrica a partir de los residuos de la producción de café*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Barcelona, U. d. (2017). *Sior*. Recuperado el 16 de 2 de 2018, de <http://sior.ub.edu/jspui/cris/socialimpact/socialimpact00426>
- Bgreenproject. (07 de 05 de 2013). *Bgreenproject*. Recuperado el 18 de 1 de 12, de <https://bgreenproject.wordpress.com/2013/05/07/biomasa-conversion-en-energia-y-sistemas-de-aprovechamiento/>.
- Botero, R. B. (2017). *Biotecnología práctica*. Recuperado el 21 de 12 de 2017, de <https://bioreactorcrc.wordpress.com/2011/03/31/biodigestor-de-bajo-costos/>
- Carlos Forero, C. A. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión de los procesos de gasificación. *Iteckne*, 21-30.
- Carlos Razo, C. L.-M. (2007). *Producción de biomasa para biocombustibles líquidos: El potencial de América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Castro Martínez, S. (2015). *Instalación y arranque de un prototipo de gasificación. Ingeniero mecánico*. Universidad nacional autónoma de México.
- Castro, N. (2016). Sugar-Ethanol Bioelectricity in the Electricity Matrix. *Ethanol and bioelectricity*, 145.

- CEN. (2003). *Technical specification* . Bruselas: European committee for standardization .
- Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos. (2014). *La microgeneración con biomasa*. Universidad de Zaragoza.
- CIEMAT. (2008). *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas*. Recuperado el 1 de 11 de 2017, de <http://www.ciemat.es/>
- Clotario Tapia, C. p. (2006). Aplicación de las Fibras Naturales en el Desarrollo de Materiales Compuestos y como biomasa . *Revista tecnológica ESPOL*, 113-120.
- Comisión Nacional de Energía. (2017). *Guía para evaluación ambiental energías renovables no convencionales*. Santiago. Santiago.
- Comunidad de Madrid. (2010). *Guía de Valorización energética de residuos*. Madrid - España.
- Comunidad de Madrid. (2010). *Guía de Valorización energética de residuos*. Madrid.
- Corrales, L. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 58.
- Da Costa, H. V. (2007). *Alcoholic fermentation: An option for renewable energy production from agricultural residues*.
- Dinero. (19 de 1 de 2010). *Brasil se convierte en el primer país en producir electricidad a partir de etanol*. Recuperado el 15 de 1 de 2018, de <http://www.dinero.com/actualidad/noticias/articulo/brasil-convierte-primer-pais-producir-electricidad-partir-etanol/89673>
- ECOFYS, D. G. (2005). Planning and installing bionergy systems: a guide for installers, architects and engineers. UK: James & James.

Eduambiental, C. (15 de Julio de 2015). *Comunidad Eduambiental* . Recuperado el 28 de 2 de 2018, de <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo18.pdf>

Energías renovables. (3 de 12 de 2014). Recuperado el 22 de 1 de 2018, de <http://www.energiasrenovablesinfo.com/biomasa/fabricacion-pellets/>

Energipedia. (2012). *Energipedia*. Recuperado el 15 de 2 de 2018, de https://energypedia.info/wiki/Electricity_Generation_from_Biogas#toc

Faaij, A. (2014). *Biomass Combustion*. Encyclopedia of Energy.

FAO. (2014). *Bioenergía y seguridad alimentaria evaluación rápida*. New York.

Fedebiocombustibles. (2017). Recuperado el 15 de 1 de 2018, de [http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-mostrar_info-titulo-Alcohol_Carburante_\(Etanol\).htm](http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-mostrar_info-titulo-Alcohol_Carburante_(Etanol).htm)

Fernández, J. (2008). Energías e la biomasa . *Energías renovables para todos*, 12-13.

Fernández, J. (2011). *Energía de la biomasa*. Madrid: Haya Comunicación .

Fernández, M. (2008). *Análisis de alternativas tecnológicas e ingeniería conceptual de una biorefinería lignocelulósica*. Escuela superior de ingenieros de Sevilla.

GAIA. (2016). *Análisis de Tecnologías de Riesgo*. Recuperado el 14 de Febrero de 2018, de <http://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificación-y-pirólisis-2017-ESP.pdf>

Goetzl, A. (2015). *DEVELOPMENTS IN THE GLOBAL TRADE OF WOOD PELLETS*. Washington: OFFICE OF INDUSTRIES WORKING PAPER U.S. International Trade Commission.

- Gollakota, Kishore, & Gu. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1378-1392.
- Gonzales Gavilánez, & Lucía Izabela. (2012). *Optimización del proceso de combustión para el tratamiento de la caliza en la obtención de cal y derivados de la composición de los nevados*. Escuela Superior politécnica de Chimborazo., Biobamba, Ecuador.
- Hancsók, J. K. (2007). Investigation of the production of high cetane number bio gas oil from pre-hydrogenated vegetable oils over Pt/HZSM-22/Al₂O₃. *Microporous and Mesoporous materials*, 148-152.
- Hendry, J. (1 de 12 de 2017). *Biomass Magazine* . Recuperado el 24 de 2 de 2018, de <http://biomassmagazine.com/articles/14855/molding-a-new-pellet-design>
- Highman, C. (2003). *gasification*. Burtg: Elsevier.
- I. Obernberger, G. T. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior . *Biomass and Bioenergy*, 653.
- IDAE. (Octubre de 2007). Manuales de energías renovables. *Energía de la biomasa*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- IEA. (2009). *International Energy Agency, World Energy Outlook 2009*. Paris.
- IEA. (2010). *Energy Technology Perspectives - Scenarios and Strategies to 2050*. International Energy Agency, Paris.
- IEA. (2011). *Annual Report 2011*. París: IEA Bioenergy.
- IEA. (2017). *Global Wood Pellet industry and trade study 2017*. Washington: IEA Bioenergy.
- IRENA. (2017). *BIOFUELS FOR AVIATION TECHNOLOGY BRIEF*. Abu Dhabi: IRENA ORG.

- J. Arauzo, F. J. (2014). *Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa*. Zaragoza: Bol. Grupo Español Carbón.
- Jennifer García, E. L. (2015). *“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR HINDÚ ANAEROBIO EN LA FINCA “LOS CUENCANOS” DE LA PARROQUÍA GARCÍA MORENO”*. Ribamba-Ecuador.
- Jeremías Arauz, P. M. (2012). *Biodigestores*. Rionegro: Universidad nacional.
- Jiménez, D. D. (2012). *Evaluacion de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo* . Xalapa-Veracruz.
- Kingtiger Group. (14 de Febrero de 2018). *Waste Tyre Pyrolysis Plant Manufacturer - KT Group*. Obtenido de <http://kingtigergroup.com/waste-tyre-pyrolysis-plant/>
- Klug, M. (2012). Pirólisis un proceso para derretir la biomasa. *Revista de química PUCP*, 26, 37-40.
- López, J. (14 de 05 de 2014). *Ciencia y cemento*. Recuperado el 27 de 2 de 2018, de <http://wp.cienciaycemento.com/peletizados-la-fabrica-de-pelets-clave-para-el-avance-de-la-biomasa/>
- Martínez, p. E. (2014). Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. *innovaciencia* , 49-50.
- Massi, E. (2012). *anaerobic digestion* . Springer.
- McKendry, P. (2012). *Energy production from biomass. Part II: Conversion Technologies*.
- Morán, D. (27 de 03 de 2016). *Biorefinerie blog*. Recuperado el 8 de 2 de 2018, de <https://biorrefineria.blogspot.com.co/2015/09/biorrefinerias-de-aceites-vegetales-hidrotratados-hvo.html>
- Nogués, F. (2010). *Energía de la biomasa II (Energías renovables)*. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.

- Pantoja Díaz, J. (2015). *Participación en el diseño de un horno de pirólisis piloto de residuos agroindustriales con funcionamiento por etapas para producir biochar en el área de investigación y desarrollo i&d de la empresa innovactiva ingeniería s.a.s.* Universidad de Nariño.
- Patentscope.wipo.int. (2018). *OMPI – Búsqueda en las colecciones de patentes nacionales e internacionales.* Recuperado el 24 de Noviembre de 2017, de <https://patentscope.wipo.int/search/es/result.jsf>.
- Pérez , J., Borge, D., & Agudelo, J. (Marzo de 2010). Proceso de gasificación: una revisión de estudios teórico - experimentales. *Rev. Fac. Ing.Univ. Antioquia*, 52, 95-107.
- Ramírez, L. (2017). POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL PECUARIA DEL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA – COLOMBIA. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- REN21. (2017). RENEWABLES GLOBAL STATUS REPORT . En *REN21* (pág. 167). París: Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente.
- Rico, J. (12 de 10 de 2016). *Energías renovables- el periodismo de las energías limpias* . Recuperado el 23 de 12 de 2017, de <https://www.energias-renovables.com/biogas/biogas-mundial-hasta-2016-notable-crecimiento-sin-20130116>
- Roca, J. A. (1 de 11 de 2016). *El periódico de la energía* . Recuperado el 23 de 1 de 2018, de <http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-de-biomasa-del-mundo/>
- Romero, D. (2011). *Obtención de combustibles renovables mediante hidrotratamiento catalítico de aceites vegetales y gasóleo.* México.
- Rosario, B. d. (2016). *informativo semanal* . Rosario.
- S.L.Douvartzides. (2014). International Journal of Hydrogen Energy. En S.L.Douvartzides. F. Barbir.

- Sadhukhan, J., Zhao, Y., Shah, N., & Brandon, N. (2010). Performance analysis of integrated biomass gasification fuel cell (BGFC) and biomass gasification combined cycle (BGCC) systems. *Chem. Eng. Sci*, 65, 1942–1954.
- Sanguino Barajas, Téllez Anaya, Escalante Hernández , & Vasquez Cardozo . (2010). Aprovechamiento energetico de la biomasa residual del sector agricola. *Revista ION*, 22, 43-52.
- SGI&C-FNCER. (1 de 10 de 2017). *SGI&C-FNCER*. Recuperado el 20 de 12 de 2017, de <http://www.upme.gov.co:81/sgic/?q=content/colombia-apuesta-por-los-biodigestores-para-generar-biog%C3%A1s-en-las-%C3%A1reas-rurales>
- Susaeta, F. M. (2013). *Análisis de factibilidad técnica y económica de la generación de biogás a partir de purines mediante biodigestores anaerobios*. Santiago de Chile.
- Tecnologías de biocombustibles Enterprises Inc. (2018). *A Hydrothermal Liquefaction (HTL) system to convert woody, aquatic, and waste feedstock into value added heating oils and transportation fuels*. Recuperado el 14 de Febrero de 2018, de <http://www.bteinc.net>
- Unión Europea. (2014). El programa marco de investigación e innovación de la unión europea., (págs. 1- 40). Luxemburgo.
- UPME. (2010). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en COlombia*. Bogotá: UPME.
- Varnero, M. (2011). *Manual del biogás*. Santiago de CHile: FAO.
- vinibiodigestor. (s.f.). *Pig Market*. Recuperado el 24 de 11 de 2017, de <http://razasporcinas.com/pigmarket/producto/biodigestores-modulares-para-produccion-de-biogas-y-bioabono/>

Volonterio, E. B. (2017). Hidrotratamiento catalítico de aceites vegetales para la producción de biocombustibles líquidos. *REVISTA DEL LABORATORIO TECNOLÓGICO DEL URUGUAY*, 37-43.

Zwebe, D. (2010). Comercialización de la tecnología de pirólisis. *PALMAS*, 31, 110-114.

Anexo A. Costos producción electricidad a partir de pellets de biomasa.

			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)						
			10		40		100		
			Horas de operación por año 2920		Horas de operación por año 2921		Horas de operación por año 2922		
Insumos	Unidad	Precio /unidad	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	
Materia prima	t	0,1	100	21	400	82	1000	206	
Agua	m^2	0,5	3	1	11	5	27	13	
Diésel necesario para la puesta	Litro	1	55	55	219	219	548	548	
Subtotal				77	306	767			
Mano de obra y costos varios	Unidad	Precio (USD/persona)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	
Trabajador no cualificado		1,3	1	3650	3	10950	6	21900	
Trabajador cualificado		2	1	5840	1	5840	2	11680	
Costos Varios		20%		1898	20%	3358	20%	6716	
Subtotal				11388	20148	40296			
Transporte de materias primas	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	
Materia prima (Línea a la planta)	Km	0,1	1	20	5	400	10	1999	
Subtotal				20	400	1999			
Almacenamiento	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	
Materia prima	t	3	117	351	467	1401	1167	3501	
Subtotal				351	1401	3501			
Inversión	Unidad	Años	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)	
Equipos	USD	20	75000	3750	300000	15000	745000	37250	
Construcción	USD	20	3870	194	15480	774	38442	1922	
Instalación	USD	20	2212,5	111	8850	443	21977,5	1099	
Red de distribución	USD	20	997,5	50	3990	200	9908,5	495	
Subtotal				82080	4104	328320	16416	815328	40766
Costos de mantenimiento		25%		1026		4104		10192	
Subtotal				5130	20520	50958			
Otros costos	Unidad	Tasa (%)		Total (USD /año)		Total (USD /año)		Total (USD /año)	
Gastos generales de la planta	USD	20%		2059		3853		7441	
Gastos administrativos	USD	10%		1433		2678		5213	
Interés de créditos	USD	12%		540		1656		2427	
Impuestos sobre la renta	USD	0%		-		-		-	
Subtotal				4032	8187	15081			
			Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)	
Costos de operación totales			11836	60%	22255	58%	46563	58%	
Costos fijos totales			5130	20%	20520	23%	50958	23%	
Otros costos totales			4032	20%	8187	19%	15081	19%	
Costos de producción totales			20998		50962		112602		
			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)						
			10		40		100		
Generación de energía	Unidad	Detalles							
Generación de energía	Kwh/año	Rendimiento de generación 85%	24820		99280		248200		
Electricidad uso propio	Kwh/año	Energía para consumo de la planta 10%	2482		9928		24820		
Perdida de potencia en la Red	Kwh/año	Perdidas de potencia en la red de distribución 6%	1489		5957		14892		
Subtotal			20849		83395		208488		
			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)						
			10		40		100		
Costo unitario de la electricidad	Unidad	Detalles							
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh	Costos por hora	1,01		0,61		0,54		
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh año	Costo por año	2941		1784		1577		

Fuente: Elaboración propia a partir de (FAO, op. cit.)

Anexo B. Costos producción electricidad a partir de biodigestion de biomasa.

			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)					
			10		40		100	
			Horas de operación por año 2920		Horas de operación por año 2921		Horas de operación por año 2922	
Insumos	Unidad	Precio /unidad	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)
Materia prima	t	0,1	240	21	1666	82	2400	206
Agua	m^2	0,5	3	1	11	5	27	13
Diésel necesario para la puesta	Litro	1	55	55	219	219	548	548
Subtotal				77		306		767
Mano de obra y costos varios	Unidad	Precio (USD/persona)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)
Trabajador no cualificado		1,3	1	3650	3	10950	6	21900
Trabajador cualificado		2	1	5840	1	5840	2	11680
Costos Varios			20%	1898	20%	3358	20%	6716
Subtotal				11388		20148		40296
Transporte de materias primas	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)
Materia prima (Línea a la planta)	Km	0,1	1	20	5	400	10	1999
Subtotal				20		400		1999
Almacenamiento	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)
Materia prima	t	3	117	351	467	1401	1167	3501
Subtotal				351		1401		3501
Inversión	Unidad	Años	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)
Equipos	USD	20	55000	2750	220000	11000	550000	27500
Construcción	USD	20	2838	142	11352	568	28380	1419
Instalación	USD	20	1622,5	81	6490	325	16225	811
Red de distribución	USD	20	731,5	37	2926	146	7315	366
Subtotal			60192	3010	240768	12038	601920	30096
Costos de mantenimiento		25%		752		3009,6		7524
Subtotal				3762		15048		37620
Otros costos	Unidad	Tasa (%)		Total (USD /año)		Total (USD /año)		Total (USD /año)
Gastos generales de la planta	USD	20%		2059		3853		7441
Gastos administrativos	USD	10%		1433		2678		5213
Interés de créditos	USD	12%		540		1656		2427
Impuestos sobre la renta	USD	0%		-		-		-
Subtotal				4032		8187		15081
			Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)
Costos de operación totales			11836	60%	22255	58%	46563	58%
Costos fijos totales			3762	20%	15048	23%	37620	23%
Otros costos totales			4032	20%	8187	19%	15081	19%
Costos de producción totales			19630		45490		99264	
			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)					
			10		40		100	
Generación de energía	Unidad	Detalles	10		40		100	
Generación de energía	Kwh/año	Rendimiento de generación 85%	24820		99280		248200	
Electricidad uso propio	Kwh/año	Energía para consumo de la planta 10%	2482		9928		24820	
Perdida de potencia en la Red	Kwh/año	Perdidas de potencia en la red de distribución 6%	1489		5957		14892	
Subtotal			20849		83395		208488	
			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)					
			10		40		100	
Costo unitario de la electricidad	Unidad	Detalles	10		40		100	
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh	Costos por hora	0,94		0,55		0,48	
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh año	Costo por año	2749		1593		1390	

Fuente: Elaboración propia a partir de (ídem)

Anexo C. Costos producción electricidad a partir de fermentación alcohólica de biomasa.

			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)						
			10		40		100		
			Horas de operación por año 2920		Horas de operación por año 2921		Horas de operación por año 2922		
Insumos	Unidad	Precio /unidad	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	
Materia prima	t	0,1	56	21	222	82	556	206	
Agua	m^2	0,5	3	1	11	5	27	13	
Diésel necesario para la puesta	Litro	1	55	55	219	219	548	548	
Subtotal				77		306		767	
Mano de obra y costos varios	Unidad	Precio (USD/persona)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	
Trabajador no cualificado		1,3	1	3650	3	10950	6	21900	
Trabajador cualificado		2	1	5840	1	5840	2	11680	
Costos Varios			20%	1898	20%	3358	20%	6716	
Subtotal				11388		20148		40296	
Transporte de materias primas	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	
Materia prima (Línea a la planta)	Km	0,1	1	20	5	400	10	1999	
Subtotal				20		400		1999	
Almacenamiento	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	
Materia prima	t	3	117	351	467	1401	1167	3501	
Subtotal				351		1401		3501	
Inversión	Unidad	Años	Total (USD /año)	Depreciación (USD/año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD/año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD/año)	
Equipos	USD	20	90000	4500	320000	16000	900000	45000	
Construcción	USD	20	4644	232	16512	826	46440	2322	
Instalación	USD	20	2655	133	9440	472	26550	1328	
Red de distribución	USD	20	1197	60	4256	213	11970	599	
Subtotal			98496	4925	350208	17510	984960	49248	
Costos de mantenimiento		25%		1231		4377,6		12312	
Subtotal				6156		21888		61560	
Otros costos	Unidad	Tasa (%)		Total (USD /año)		Total (USD /año)		Total (USD /año)	
Gastos generales de la planta	USD	20%		2059		3853		7441	
Gastos administrativos	USD	10%		1433		2678		5213	
Interés de créditos	USD	12%		540		1656		2427	
Impuestos sobre la renta	USD	0%		-		-		-	
Subtotal				4032		8187		15081	
				Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)
Costos de operación totales				11836	60%	22255	58%	46563	58%
Costos fijos totales				6156	20%	21888	23%	61560	23%
Otros costos totales				4032	20%	8187	19%	15081	19%
Costos de producción totales				22024		52330		123204	
			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)						
			10		40		100		
Generación de energía	Unidad	Detalles	10		40		100		
Generación de energía	Kwh/año	Rendimiento de generación 85%	24820		99280		248200		
Electricidad uso propio	Kwh/año	Energía para consumo de la planta 10%	2482		9928		24820		
Perdida de potencia en la Red	Kwh/año	Perdidas de potencia en la red de distribución 6%	1489		5957		14892		
Subtotal			20849		83395		208488		
			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)						
			10		40		100		
Costo unitario de la electricidad	Unidad	Detalles	10		40		100		
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh	Costos por hora	1,06		0,63		0,59		
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh año	Costo por año	3085		1832		1726		

Fuente: Elaboración propia a partir de (idem)

Anexo D. Costos producción electricidad a partir de pirolisis biomasa.

			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)					
			10		40		100	
			Horas de operación por año 2920		Horas de operación por año 2921		Horas de operación por año 2922	
Insumos	Unidad	Precio /unidad	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)
Materia prima	t	0,1	200	21	800	82	2000	206
Agua	m^2	0,5	3	1	11	5	27	13
Diésel necesario para la puesta	Litro	1	55	55	219	219	548	548
Subtotal				77		306		767
Mano de obra y costos varios	Unidad	Precio (USD/persona)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)
Trabajador no cualificado		1,3	1	3650	3	10950	6	21900
Trabajador cualificado		2	1	5840	1	5840	2	11680
Costos Varios		20%		1898	20%	3358	20%	6716
Subtotal				11388		20148		40296
Transporte de materias primas	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)
Materia prima (Línea a la planta)	Km	0,1	1	20	5	400	10	1999
Subtotal				20		400		1999
Almacenamiento	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)
Materia prima	t	3	117	351	467	1401	1167	3501
Subtotal				351		1401		3501
Inversión	Unidad	Años	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)
Equipos	USD	20	80000	4000	320000	16000	800000	40000
Construcción	USD	20	4128	206	16512	826	41280	2064
Instalación	USD	20	2360	118	9440	472	23600	1180
Red de distribución	USD	20	1064	53	4256	213	10640	532
Subtotal			87552	4378	350208	17510	875520	43776
Costos de mantenimiento		25%		1094		4377,6		10944
Subtotal				5472		21888		54720
Otros costos	Unidad	Tasa (%)		Total (USD /año)		Total (USD /año)		Total (USD /año)
Gastos generales de la planta	USD	20%		2059		3853		7441
Gastos administrativos	USD	10%		1433		2678		5213
Interés de créditos	USD	12%		540		1656		2427
Impuestos sobre la renta	USD	0%		-		-		-
Subtotal				4032		8187		15081
			Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)
Costos de operación totales			11836	60%	22255	58%	46563	58%
Costos fijos totales			5472	20%	21888	23%	54720	23%
Otros costos totales			4032	20%	8187	19%	15081	19%
Costos de producción totales			21340		52330		116364	
			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)					
			10		40		100	
Generación de energía	Unidad	Detalles	10		40		100	
Generación de energía	Kwh/año	Rendimiento de generación 85%	24820		99280		248200	
Electricidad uso propio	Kwh/año	Energía para consumo de la planta 10%	2482		9928		24820	
Perdida de potencia en la Red	Kwh/año	Perdidas de potencia en la red de distribución 6%	1489		5957		14892	
Subtotal			20849		83395		208488	
			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)					
			10		40		100	
Costo unitario de la electricidad	Unidad	Detalles	10		40		100	
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh	Costos por hora	1,02		0,63		0,56	
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh año	Costo por año	2989		1832		1630	

Fuente: Elaboración propia a partir de (ídem)

Anexo E. Costos producción electricidad a partir de gasificación biomasa.

			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)					
			10		40		100	
			Horas de operación por año 2920		Horas de operación por año 2921		Horas de operación por año 2922	
Insumos	Unidad	Precio /unidad	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)
Materia prima	t	0,1	200	21	800	82	2000	206
Agua	m ²	0,5	3	1	11	5	27	13
Diésel necesario para la puesta	Litro	1	55	55	219	219	548	548
Subtotal				77	306	767		
Mano de obra y costos varios	Unidad	Precio (USD/persona)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)
Trabajador no cualificado		1,3	1	3650	3	10950	6	21900
Trabajador cualificado		2	1	5840	1	5840	2	11680
Costos Varios		20%		1898	20%	3358	20%	6716
Subtotal				11388	20148	40296		
Transporte de materias primas	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)
Materia prima (Línea a la planta)	Km	0,1	1	20	5	400	10	1999
Subtotal				20	400	1999		
Almacenamiento	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)
Materia prima	t	3	117	351	467	1401	1167	3501
Subtotal				351	1401	3501		
Inversión	Unidad	Años	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD /año)
Equipos	USD	20	75000	3750	300000	15000	750000	37500
Construcción	USD	20	3870	194	15480	774	38700	1935
Instalación	USD	20	2212,5	111	8850	443	22125	1106
Red de distribución	USD	20	997,5	50	3990	200	9975	499
Subtotal			82080	4104	328320	16416	820800	41040
Costos de mantenimiento		25%		1026		4104		10260
Subtotal				5130	20520	51300		
Otros costos	Unidad	Tasa (%)		Total (USD /año)		Total (USD /año)		Total (USD /año)
Gastos generales de la planta	USD	20%		2059		3853		7441
Gastos administrativos	USD	10%		1433		2678		5213
Interés de créditos	USD	12%		540		1656		2427
Impuestos sobre la renta	USD	0%		-		-		-
Subtotal				4032	8187	15081		
			Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)
Costos de operación totales			11836	60%	22255	58%	46563	58%
Costos fijos totales			5130	20%	20520	23%	51300	23%
Otros costos totales			4032	20%	8187	19%	15081	19%
Costos de producción totales				20998	50962	112944		
			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)					
			10		40		100	
Generación de energía	Unidad	Detalles	10		40		100	
Generación de energía	Kwh/año	Rendimiento de generación 85%	24820		99280		248200	
Electricidad uso propio	Kwh/año	Energía para consumo de la planta 10%	2482		9928		24820	
Perdida de potencia en la Red	Kwh/año	Perdidas de potencia en la red de distribución 6%	1489		5957		14892	
Subtotal			20849		83395		208488	
			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)					
			10		40		100	
Costo unitario de la electricidad	Unidad	Detalles	10		40		100	
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh	Costos por hora	1,01		0,61		0,54	
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh año	Costo por año	2941		1784		1582	

Fuente: Elaboración propia a partir de (ídem)

Anexo F. Costos producción electricidad a partir de combustión directa de biomasa.

			Capacidad de generación (Kw de generación de energía)						
			10		40		100		
			Horas de operación por año 2920		Horas de operación por año 2921		Horas de operación por año 2922		
Insumos	Unidad	Precio /unidad	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad /año)	Total (USD /año)	
Materia prima	t	0,1	200	21	800	82	2000	206	
Agua	m^2	0,5	3	1	11	5	27	13	
Diésel necesario para la puesta	Litro	1	55	55	219	219	548	548	
Subtotal				77		306		767	
Mano de obra y costos varios	Unidad	Precio (USD/persona)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	
Trabajador no cualificado		1,3	1	3650	3	10950	6	21900	
Trabajador cualificado		2	1	5840	1	5840	2	11680	
Costos Varios		20%	20%	1898	20%	3358	20%	6716	
Subtotal				11388		20148		40296	
Transporte de materias primas	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	
Materia prima (Línea a la planta)	Km	0,1	1	20	5	400	10	1999	
Subtotal				20		400		1999	
Almacenamiento	Unidad	Precio (USD/t/km)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	Cantidad (Unidad)	Total (USD /año)	
Materia prima	t	3	117	351	467	1401	1167	3501	
Subtotal				351		1401		3501	
Inversión	Unidad	Años	Total (USD /año)	Depreciación (USD/año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD/año)	Total (USD /año)	Depreciación (USD/año)	
Equipos	USD	20	70000	3500	280000	14000	700000	35000	
Construcción	USD	20	3612	181	14448	722	36120	1806	
Instalación	USD	20	2065	103	8260	413	20650	1033	
Red de distribución	USD	20	931	47	3724	186	9310	466	
Subtotal			76608	3830	306432	15322	766080	38304	
Costos de mantenimiento		25%		958		3830,4		9576	
Subtotal				4788		19152		47880	
Otros costos	Unidad	Tasa (%)		Total (USD /año)		Total (USD /año)		Total (USD /año)	
Gastos generales de la planta	USD	20%		2059		3853		7441	
Gastos administrativos	USD	10%		1433		2678		5213	
Interés de créditos	USD	12%		540		1656		2427	
Impuestos sobre la renta	USD	0%		-		-		-	
Subtotal				4032		8187		15081	
				Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)	Total (USD /año)	Parte (%)
Costos de operación totales				11836	60%	22255	58%	46563	58%
Costos fijos totales				4788	20%	19152	23%	47880	23%
Otros costos totales				4032	20%	8187	19%	15081	19%
Costos de producción totales				20656		49594		109524	
	Unidad	Detalles	Capacidad de generación (Kw de generación de energía)						
			10	40	100				
Generación de energía	Kwh/año	Rendimiento de generación 85%	24820	99280	248200				
Electricidad uso propio	Kwh/año	Energía para consumo de la planta 10%	2482	9928	24820				
Perdida de potencia en la Red	Kwh/año	Perdidas de potencia en la red de distribución 6%	1489	5957	14892				
Subtotal			20849	83395	208488				
	Unidad	Detalles	Capacidad de generación (Kw de generación de energía)						
			10	40	100				
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh	Costos por hora	0,99	0,59	0,53				
Costo unitario de la electricidad	USD/Kwh año	Costo por año	2893	1736	1534				

Fuente: Elaboración propia a partir de (ídem)