

Determinación del Potencial de Generación Eléctrica a Partir de Biomasa en el Ecuador

Determination of the Potential Electric Generation from Biomass in Ecuador

José Serrano¹, William Mejía², Juvenal Ortiz¹, Andrea Sánchez³, Silvana Zalamea¹

1 Departamento de Biociencias, Grupo de Ingeniería de Reactores y Catálisis, Universidad de Cuenca, jose.serrano@ucuenca.edu.ec

2 Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables INER.

3 Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Azuay.

Recibido: 30-05-2017. Aceptado después de revisión: 18-09-2017

Resumen. El consumo energético mundial se ha incrementado con el paso de los años para satisfacer las necesidades de una sociedad altamente demandante. El Ecuador no está exento de esta realidad, dependiendo su economía en gran medida de los combustibles fósiles. Sin embargo, es posible aminorar esta dependencia si se considera a la biomasa proveniente de residuos agrícolas de la producción de cultivos entre los que se destacan el banano, arroz, caña de azúcar y cacao como una potencial fuente de energía. En el presente artículo, se evaluó el potencial de generación de energía eléctrica efectivo de los residuos agrícolas de los cultivos antes mencionados empleando una metodología que contempla la estimación de la disponibilidad real de biomasa, sus poderes caloríficos inferiores y el rendimiento global de planta equivalente de tecnologías de conversión energética de biomasa como la combustión directa CD, la gasificación con turbina de gas GTG, la gasificación con ciclo combinado GCC, y la pirólisis con ciclo combinado PCC. Los resultados muestran que el banano, al presentar la mayor cantidad de residuos producidos por año, posee los mayores potenciales de generación de energía eléctrica: 119,5 GWh mediante CD, 150,3 GWh por medio de GTG, 201,2 GWh a través de GCC y 186,2 GWh mediante PCC.

Palabras Claves: potencial energético, biomasa, generación de electricidad.

Abstract. Energy consumption worldwide has increased over the years to meet the needs of a society whose population is increasing. Ecuador is not exempt from this reality; its economy is largely dependent on fossil fuels. However, it is possible to lessen this dependence by considering the biomass from agricultural residues of crop production, among which, banana, rice, sugar cane and cocoa stand out as a potential sources of energy. In the present article, the potential of effective electric power generation of the residues coming from the mentioned crops was evaluated using a methodology that considers the estimation of the real availability of biomass, its low heating values and the overall yield of equivalent plant of technologies of Biomass energy conversion such as direct combustion DC, gasification coupled with gas turbine TGG, gasification with combined cycle CCG, and pyrolysis with combined cycle CCP. The results show that banana, with the largest amount of waste produced per year, has the greatest potential for electricity generation: 119.5 GWh through DC, 150.3 GWh through TGG, 201.2 GWh through CCG and 186.2 GWh by CCP.

Keywords: energetic potential, biomass, electricity generation.

1. Introducción

1.1 Contexto

El objetivo principal del presente estudio es construir una línea base teórica sobre el potencial de generación eléctrica a partir de los residuos agrícolas de los principales cultivos ecuatorianos. A pesar de que existe información sobre las tecnologías de conversión energética de la biomasa [1, 2], todavía no se ha realizado una investigación puntual en cuanto al potencial de generación de energía eléctrica a partir de los residuos agrícolas mediante dichas tecnologías. En este sentido, este estudio pretende complementar la información actualmente disponible, construyendo un marco de referencia para la realización posterior de estudios más detallados que permitan determinar capacidades de las plantas de conversión energética de la biomasa, cadenas de transporte de residuos entre otros.

El desarrollo social, tecnológico y cultural que en la actualidad experimenta la humanidad ha sido posible por la amplia disponibilidad de fuentes energéticas tanto renovables como no renovables. Combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural constituyen la columna vertebral del sector energético mundial y representan aproximadamente el 80% de la demanda energética [3], a pesar de ser considerados como una de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero [4]. Sin embargo, conforme se incrementa la población se necesita una provisión energética más elevada. Se prevé que para 2050 la demanda proyectada estará en el rango de 600-1000 EJ [5].

El Ecuador no es ajeno a esta realidad. De acuerdo al Balance Energético Nacional [6], para el año 2015, el consumo energético promedio per cápita fue de 5,28 BEP. En base a esto, se presentó un ascenso en el consumo energético per cápita en el país del orden del 25%, con respecto a los de 4,22 BEP consumidos en 2005. Por otra parte, según el Banco Mundial, el mismo indicador a nivel global fue de 13,78 BEP y a nivel latinoamericano de 9,55 BEP durante el mismo periodo. En base a estas cifras, una persona en el Ecuador consume el 38,31% comparado con la media mundial, y el 55,29% con respecto al promedio latinoamericano, observándose que el consumo energético per cápita del país todavía sigue siendo inferior inclusive a nivel regional como lo indica la Figura 1.

Otro indicador relevante en el desarrollo de una sociedad es el empleo de electricidad para el desarrollo de las actividades de la vida cotidiana. De acuerdo al Balance Energético Nacional [6], para el año 2005 el consumo de energía eléctrica promedio per cápita fue de 933 kWh.

La misma cifra para el 2015 fue de 1436 kWh, existiendo un aumento de alrededor del 54% en el consumo. Según el Banco Mundial, el consumo de energía eléctrica promedio per cápita a nivel global fue de 3144,3 kWh y a nivel latinoamericano de 2121 kWh para el año 2015. En función de estas cifras, una persona en el Ecuador consume el 45,66% comparado con la media mundial, y el 67,70% con respecto al promedio latinoamericano, evidenciándose que el consumo de electricidad está bajo la media mundial y regional como se observa en la Figura 1.

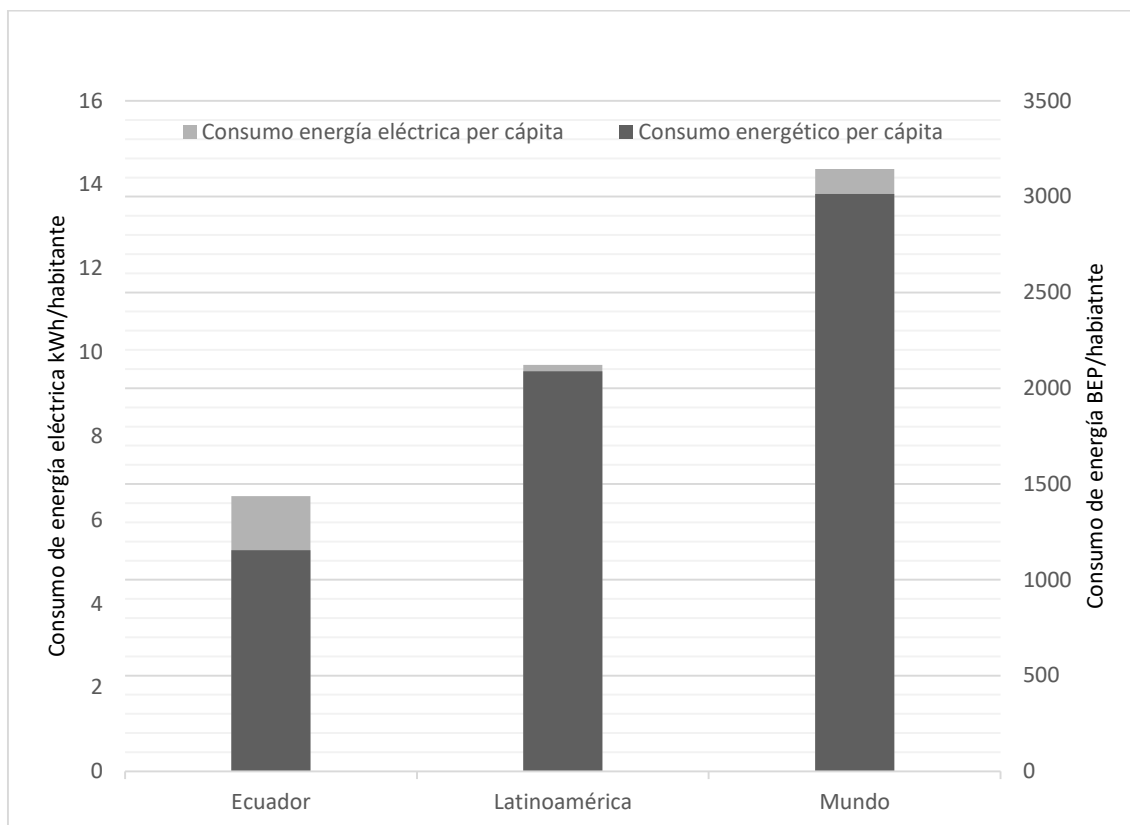


Figura 1. Consumo energético per cápita y consumo de energía eléctrica per cápita (<http://data.worldbank.org>).

El gobierno del Ecuador ha implementado una serie de políticas estratégicas para responder al aumento del consumo energético y particularmente de electricidad, entre ellas el apoyo a la inclusión de las energías renovables dentro de la matriz energética [7]. Las energías renovables aportan con el 8% del total de energía primaria generada en el país, contribuyendo la hidroenergía con un 5% y la biomasa con la diferencia [6]. Con respecto a la generación de energía eléctrica, para el año 2015 el aporte renovable fue de 51,54%, como se muestra en la Figura 2.

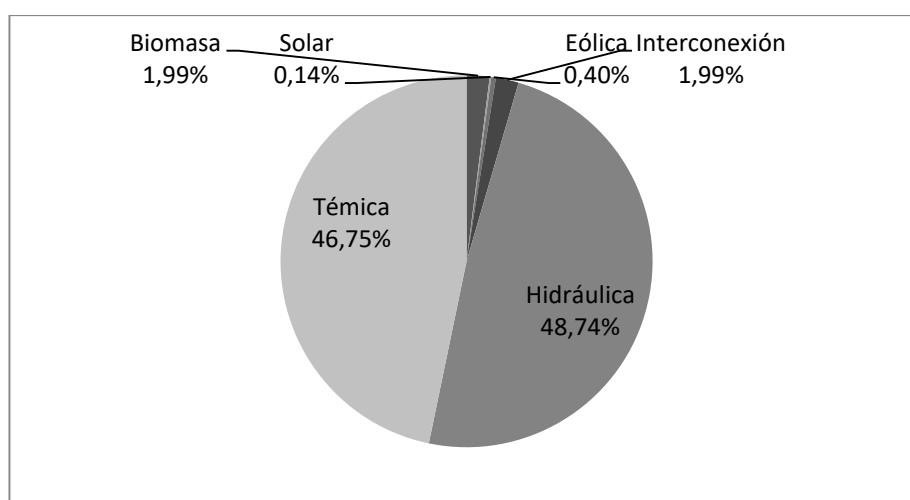


Figura 2. Generación de energía eléctrica por fuente en Ecuador [6].

La biomasa, a pesar de no estar ampliamente considerada como una fuente de generación sustentable de energía eléctrica según lo indica la Figura 2, presenta un futuro prometedor, principalmente por: a) Es un recurso renovable que puede ser desarrollado de manera sostenible en un futuro, b) Es amigable con el medio ambiente debido a que presenta una tasa neta de emisiones de CO₂ nula y c) Tiene un potencial económico significativo frente al precio de los combustibles fósiles, que va en aumento [8].

El Ecuador por ser un país eminentemente agrícola posee grandes extensiones de cultivos, tanto permanentes (banano, cacao, plátano, caña de azúcar) como transitorios (maíz, arroz). Para el año 2014, la producción de residuos agrícolas superó los 10 millones de toneladas, distribuidas por tipo de cultivo como se indica en la Figura 3 [1]:

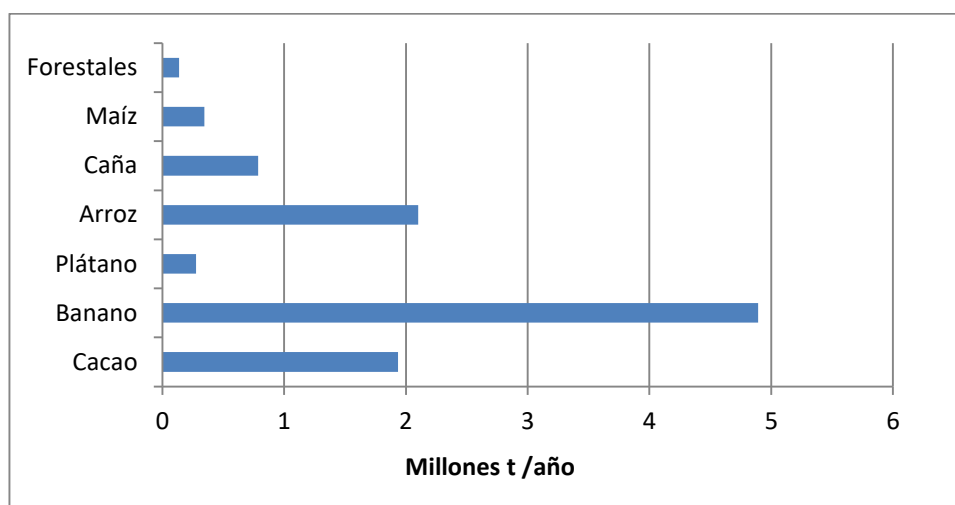


Figura 3. Producción de residuos agrícolas en Ecuador [1].

Esta elevada cantidad de residuos producidos permite la apertura de un campo interesante de explotación de los mismos a través de su conversión energética a electricidad, calor y producción de biocombustibles de elevado valor agregado [9].

En la presente investigación se cuantificará el potencial de generación de energía eléctrica a partir de biomasa procedente de diferentes residuos agrícolas que se encuentran en el Ecuador mediante tecnologías de conversión energética que han sido ampliamente estudiadas y aplicadas en los sistemas de generación de energía eléctrica.

1.2 Clasificación y composición de la biomasa

De acuerdo a su procedencia, la biomasa puede clasificarse en [1]:

- a) *Biomasa natural*: Biomasa producida en forma espontánea en los ecosistemas naturales, por ejemplo bosques.
- b) *Biomasa residual*: Son los subproductos derivados de las actividades agrícolas, ganaderas, humanas y forestales. Esta a su vez puede clasificarse en:
 - *Biomasa residual seca*: Aquella procedente de recursos generados por actividad agrícola, forestal, industria agroalimentaria e industria maderera.
 - *Biomasa residual húmeda*: La constituyen los vertidos biodegradables, tales como aguas residuales e industriales incluidos los residuos agrícolas.

Cualquier tipo de biomasa está conformada principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, en composiciones que pueden variar dependiendo del tipo de planta [10]. Como

se observa en la Figura 4, la compleja estructura polimérica de haces cristalinos de celulosa se encuentra rodeada de una matriz covalentemente unida de hemicelulosa y lignina [11].

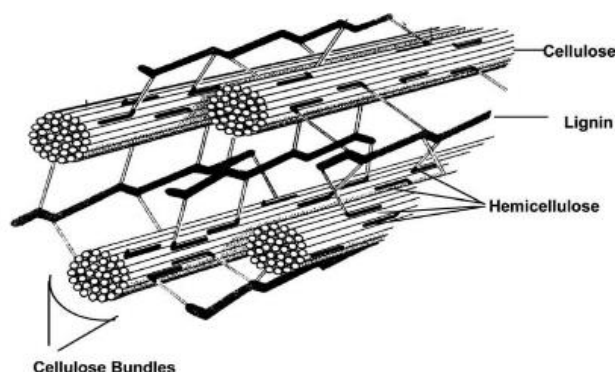


Figura 4. Representación de la estructura de la biomasa lignocelulósica [9].

La celulosa es el material orgánico más abundante en la Tierra. Está constituida por unidades monoméricas de glucosa unidas mediante enlaces β -1,4-glicosídicos. En la estructura de este polímero, es usual que se repitan continuamente dos unidades de glucosa anhidra, llamadas en conjunto unidad de celobiosa [11]. Por otra parte, la hemicelulosa consiste en una serie de diferentes monómeros polymerizados incluyendo azúcares de cinco carbonos (usualmente xilosa y arabinosa), azúcares de seis carbonos (galactosa, glucosa y manosa), y residuos de ácido 4-O-metil-glucorónico y ácido galactururónico. Debido a su naturaleza ramificada, es amorfa y relativamente fácil de hidrolizar [10]. La lignina es una sustancia polifenólica tridimensional, altamente ramificada, que consiste en un arreglo irregular de unidades de polifenilpropano, unidas mediante enlaces hidroxil- o metoxi- [12]. Las tres unidades monoméricas que conforman la lignina son: alcohol p-cumarílico, alcohol p-coniferílico y alcohol sinapílico como se observa en la Figura 5.

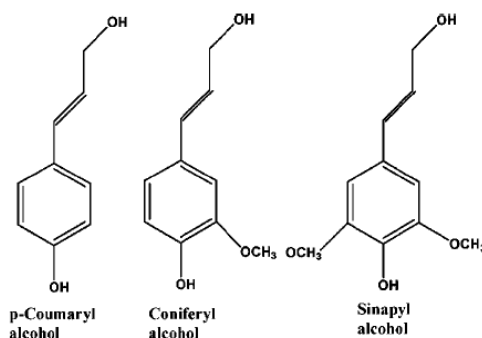


Figura 5. Monómeros de la lignina. De izquierda a la derecha se observa el alcohol p-cumarílico, alcohol p-coniferílico y el alcohol sinapílico [9].

La Lignina es considerada como una resina que da soporte tanto a la celulosa como a la hemicelulosa, formando enlaces covalentes con estos polímeros [13]. Estos componentes de la biomasa lignocelulósica constituyen las plataformas químicas para la producción de biocombustibles [14, 15].

Todos estos polímeros orgánicos están constituidos de átomos de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, azufre entre otros. Desde este punto de vista, la biomasa presenta una composición porcentual como se muestra en la Tabla 1 [16]:

Tabla 1. Composición elemental de la biomasa [16].

Elemento	Porcentaje en peso en base seca
Carbono (C)	30-60%
Oxígeno (O)	30-40%
Hidrógeno (H)	5-6%
Nitrógeno (N), Azufre (S), Cloro (Cl)	<1%

1.3 Tecnologías de conversión energética de la biomasa

Las tecnologías para la conversión energética de la biomasa pueden clasificarse atendiendo múltiples criterios. Uno de ellos está en función de la humedad de la biomasa a procesarse. Para biomasa seca, se recomiendan procesos termoquímicos y para biomasa húmeda, procesos bioquímicos [17].

Tabla 2. Clasificación de los procesos termoquímicos [16, 17].

Proceso termoquímico	Características del proceso	Productos principales	Uso primario	Tratamiento posterior de los productos principales	Productos secundarios
Combustión	Exceso de aire $700 \leq T(^{\circ}\text{C}) \leq 1400$ $P > 0.1 \text{ MPa}$	Gases a elevadas temperaturas	Vapor, calor y electricidad		
Gasificación	Oxidación parcial $500 \leq T(^{\circ}\text{C}) \leq 1300$ $P > 0.1 \text{ MPa}$	$\text{CO} + \text{H}_2$ (Gas de síntesis)	Vapor, calor y electricidad	Water Gas Shift Catalisis/ Biocatalisis	Hidrógeno Ácidos orgánicos, alcoholes
Pirólisis	Ausencia de oxígeno $300 \leq T(^{\circ}\text{C}) \leq 600$ $0.1 \leq P(\text{MPa}) \leq 0.5$	Biooils (Aceite de pirólisis)	Biocombustibles diversos	Upgrading químico (catalizadores, alta temperatura) o físico	Electricidad
		Carbón vegetal	Remediación de suelos		

Esta investigación se centrará únicamente en los procesos termoquímicos. En general, estos se clasifican de la siguiente manera Tabla 2 [16, 17]:

A continuación, se analizarán cada uno de estos procesos de conversión energética de la biomasa.

1.3.1 Pretratamiento

Uno de los principales problemas presentes dentro del pretratamiento de biomasa es el secado, el cual se define como la deshidratación de la biomasa mediante métodos naturales o forzados [18].

Cuando se habla de métodos de secado natural, se hace referencia a todo aquel proceso en el cual se emplean las temperaturas y recursos solares propios de cada región para deshidratar la biomasa sin necesidad de incurrir en gastos energéticos adicionales, los cuales restarían eficiencia al proceso de aprovechamiento energético de la biomasa. Sin embargo, este tipo de secado demanda largos periodos de espera hasta que la materia se encuentre con la cantidad de agua requerida para los procesos de conversión energética [18].

Por otra parte existen distintos métodos para el secado forzado de biomasa, cuyo factor común es el gasto energético durante el proceso de secado. Si bien por un lado se consigue reducir el tiempo en el cual se puede disponer de la biomasa para su aprovechamiento, el gasto energético (combustible, electricidad) que implicaría este proceso disminuiría considerablemente el rendimiento final del uso de biomasa con fines de conversión energética [18].

Para cuantificar este efecto, en el siguiente apartado se calculará el porcentaje de energía necesario para evaporar el agua Q_{evap} presente en la biomasa, respecto de la energía total que la biomasa posee.

1.3.2 Combustión

La combustión se define como una secuencia de reacciones químicas exotérmicas entre un combustible y un oxidante, cuyos productos principales son gases como CO, CO₂, N₂, O₂ y H₂O a elevadas temperaturas que portan gran cantidad de calor [19]. La combustión es completa si el único producto de oxidación del carbono es el CO₂, e incompleta si se produce la formación de CO. El medio más común de la conversión de biomasa en energía térmica es la combustión directa, y esta produce alrededor del 90% de toda la energía obtenida de la biomasa [20]. La combustión contribuye con más del 97% de la producción de bioenergía a nivel mundial. Esta tecnología está ampliamente probada y tiene un costo significativamente bajo, es fiable, y está disponible comercialmente [21].

La combustión es un fenómeno acoplado de transferencia de calor y masa, en el cual se producen reacciones químicas exotérmicas y cuyos productos de combustión fluyen de manera generalmente turbulenta. Existe una serie de métodos y sistemas de combustión/reactores disponibles en el mercado. Estos pueden clasificarse de manera general en dos categorías: sistemas de combustión de lecho fijo y sistemas de combustión de lecho fluidizado [22]. Para desarrollar un proceso de combustión de manera efectiva en cualquiera de los sistemas antes citados, algunos parámetros tecnológicos deben ser conocidos incluyendo la composición de la biomasa, el tipo de oxidante (aire u oxígeno), la relación oxidante/combustible (estequiometría), tipo de combustor, límites de emisiones entre otros [23].

La biomasa está formada por una fracción de materia orgánica y otra inorgánica, y estas tienen una influencia decisiva en la combustión. La primera, producida durante el proceso de fotosíntesis de la planta, contiene la mayoría de la energía almacenada que posteriormente será liberada en forma de calor. La segunda, es importante para el diseño y operación de los sistemas de combustión debido a que es responsable de problemas como el ensuciamiento por cenizas y escoria depositadas en los combustores. También se debe notar que la presencia de nitrógeno, azufre y cloro es la responsable de la formación de compuestos de riesgo (NO_x, SO_x, HCl, H₂S entre otros) que pueden afectar la calidad del aire y la vida útil de los sistemas de combustión por la corrosión producida o por las incrustaciones (compuestos alcalinos) formadas en la cámara de combustión que resulta en una disminución de la tasa transferencia de calor [24].

La biomasa presenta una elevada humedad y un alto contenido de oxígeno. La humedad constituye un problema operacional debido a que se requiere energía adicional para eliminarla por la naturaleza endotérmica del proceso de evaporación del agua. Un elevado contenido de oxígeno, ver Tabla 1, resta energía calórica al combustible. En conjunto, producen una disminución de la cantidad de energía que puede liberar la biomasa por kilogramo de materia seca (poder calorífico). En general, se puede decir que existe una relación lineal negativa entre el contenido de humedad (oxígeno) y el poder calorífico [25].

Dependiendo del poder calorífico, del contenido de humedad de la biomasa, de la cantidad de aire empleada como comburente y el diseño del horno de combustión, se pueden alcanzar temperaturas de flama de unos 1650°C.

Esta temperatura alcanzada y por tanto el calor generado debido a la exotermicidad de las reacciones de combustión, permiten que este proceso sea integrado a un sistema de generación de energía eléctrica con un ciclo Rankine, ver Figura 6, que genera vapor de media y alta presión capaz de mover turbinas acopladas a generadores que producen la energía eléctrica [26].

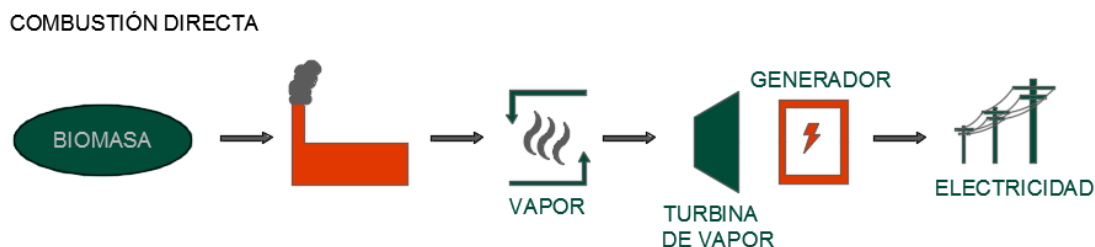


Figura 6. Esquema de generación de energía eléctrica a partir de biomasa mediante combustión directa.

Esta integración brinda la posibilidad de reducir costos de combustible y la tasa de emisiones netas de gases de efecto invernadero. Estos sistemas de generación o cogeneración por combustión de biomasa ofrecen eficiencias globales entre 30% y 40% [20, 27, 28]. Sin embargo, la dependencia del proceso de combustión de la humedad de la biomasa presenta complicaciones al momento de mantener condiciones uniformes de operación en un sistema de generación de energía eléctrica.

1.3.3 Gasificación

La gasificación se define como un proceso de conversión térmica de material orgánico para producir gases combustibles bajo condiciones reductoras (aire, oxígeno o vapor de agua). Si se efectúa en presencia de aire, este estará en cantidades sub-estequiométricas

comparada con aquellas necesarias para completar la combustión. Este proceso, llevado a cabo a altas temperaturas puede procesar biomasa sólida y líquida [16]. Mientras la gasificación compacta energía en los enlaces químicos de los productos gaseosos formados, la combustión rompe estos enlaces para liberar la energía contenida en ellos [29]. Presenta una menor tasa de emisión de CO₂ comparada con la combustión, el equipo para llevar a cabo el proceso es compacto y permite un control efectivo del proceso logrando así una elevada eficiencia térmica [30]. Además, se considera que la gasificación es un proceso más respetuoso con el medio ambiente debido a las bajas emisiones de gases tóxicos a la atmósfera y el uso más versátil de los subproductos sólidos [31].

La biomasa, usualmente con humedades entre el 30-60% puede ser procesada mediante gasificación. Sin embargo, como se observó anteriormente para la combustión, la presencia de agua afecta directamente al proceso al requerirse un mínimo de 2260 kJ de energía extra para vaporizarla [24]. Por lo tanto, un secado previo de la materia prima es altamente recomendable. Una vez ingresada la biomasa al gasificador, el agua restante es eliminada. A continuación, se produce una degradación térmica en la cual las cadenas orgánicas de elevado peso molecular se rompen en pequeñas moléculas gaseosas que no tienen mayor interacción con el agente gasificante. Es en este paso en donde se formará el alquitrán una vez que los vapores se hayan condensado. Este compuesto constituye un verdadero problema para los sistemas de gasificación al causar obstrucciones, especialmente en los ductos de descarga de productos. Después de la degradación térmica, se producen reacciones químicas entre los hidrocarburos formados, vapor de agua, dióxido de carbono, oxígeno e hidrógeno para dar lugar así a los productos finales de la combustión [16, 29, 31].

Cuando el aire es empleado como oxidante y se emplean temperaturas menores a 1000°C, el producto gaseoso generado contiene H₂, CO, CO₂, CH₄, otros hidrocarburos de bajo peso molecular conjuntamente con H₂O en estado de vapor y N₂ [32]. Cuando se emplean temperaturas mayores a 1000°C, se produce solamente el denominado gas de síntesis (CO+H₂), que es una plataforma química para la producción de hidrógeno, combustibles líquidos y electricidad [16, 30]. Las aplicaciones de los productos de la gasificación se ilustran en la Figura 7 [33]:

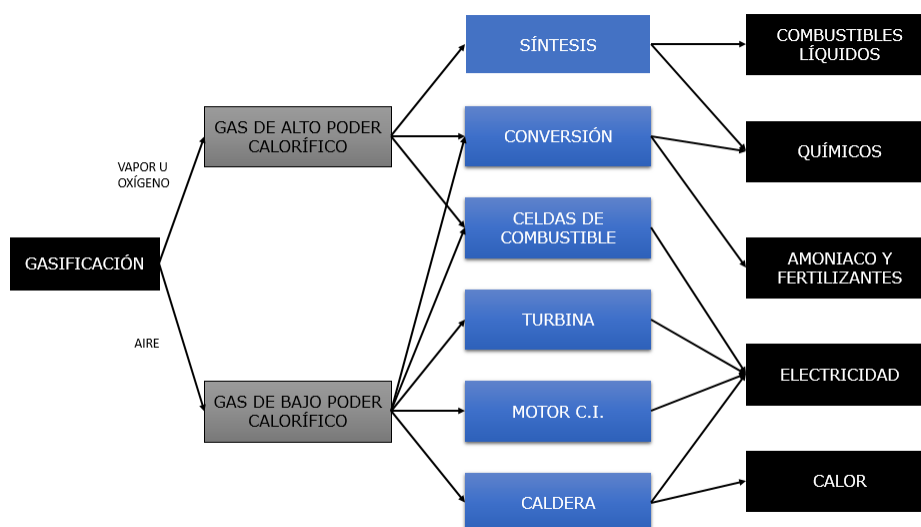


Figura 7. Aplicaciones de los productos de la gasificación [33].

Hasta ahora, los gasificadores han sido diseñados para proveer principalmente calor y electricidad a partir del gas de síntesis. Para el diseño de estos equipos, se deben tener en cuenta parámetros operacionales como [34]:

- Tipo de inyección: La biomasa puede alimentarse desde la parte superior o desde uno de los costados del equipo.
- El agente gasificante.
- El tipo de calentamiento: El aporte de calor al gasificador se puede dar por una combustión parcial de la biomasa (calentamiento directo) o por la presencia de un elemento externo de calentamiento (calentamiento indirecto).
- Rango de temperatura: Esto es importante, especialmente para la selección de materiales apropiados para la construcción del gasificador.
- Rango de presión.

La temperatura de operación, usualmente superior a 1000°C y el calor que portan los productos permiten que este proceso se pueda incorporar a la generación de electricidad. El gas de síntesis previamente purificado es enviado a una turbina de gas, generando energía eléctrica, ver Figura 8. Además, el calor residual de este proceso se puede integrar en un ciclo combinado elevando así la eficiencia de todo el proceso de generación obteniendo valores de eficiencia térmica entre 40% y 50% [28].



Figura 8. Esquema de generación de energía eléctrica a partir de biomasa mediante gasificación.

No obstante, los procesos de gasificación y posterior generación eléctrica requieren complejos sistemas de pretratamiento de la biomasa y de adaptación del combustible obtenido incrementando el costo del sistema [35].

1.3.4 Pirólisis

La pirólisis se define como un proceso de descomposición térmica que se efectúa en ausencia de oxígeno o aire para convertir la biomasa en carbón vegetal, aceites combustibles (alquitranes, hidrocarburos pesados y agua) y gases (CH_4 , H_2 , CO , CO_2 y otros hidrocarburos de bajo peso molecular) [34]. La naturaleza de los cambios químicos suscitados en la pirólisis y por tanto la distribución de los productos antes citados depende de las características físicas y químicas de la biomasa, la temperatura final del proceso (temperatura de pirólisis), la tasa de calentamiento, tiempo de residencia en la cámara de pirólisis y el diseño del reactor de pirólisis [29, 30].

En cuanto al tipo de biomasa, análisis de termogravimetría diferencial han revelado que los constituyentes principales de la biomasa tienen rangos de temperatura preferenciales para iniciar con el proceso de pirólisis [36]:

- Hemicelulosa: 150-300°C
- Celulosa: 275-350°C
- Lignina: 250-500°C

La composición, tamaño, forma y estructura física de la biomasa juegan un papel preponderante en el proceso de pirólisis debido al efecto que tienen en la transferencia de calor. Partículas de tamaño fino tienden a formar mayoritariamente productos líquidos y gaseosos, mientras que partículas de tamaño grueso tienden a formar carbón vegetal [37]. El proceso de pirólisis de la biomasa atraviesa tres fases o etapas. La primera fase, pre-pirólisis, se produce entre 120 y 200°C con una ligera pérdida de peso, por algunos reordenamientos internos, tales como la rotura de enlaces, la aparición de radicales libres, y la formación de grupos carbonilo, con la correspondiente liberación de pequeñas cantidades de H₂O, CO, y CO₂. La segunda etapa constituye el proceso de pirólisis en sí durante el cual se produce la descomposición de sólidos acompañada por una pérdida significativa de masa con respecto a su valor inicial. En la última etapa se produce la desvolatilización del carbono causada por la ruptura continua de los enlaces C-H y C-O [30, 38].

En función de la tasa de calentamiento la pirólisis puede ser clasificada a groso modo en rápida y lenta. Es lenta, si el tiempo requerido para calentar la biomasa t_{req} hasta la temperatura de pirólisis es mucho más largo que el tiempo de reacción pirolítico característico t_{pyr} . Es rápida, si lo inverso se cumple. Sin embargo, esta clasificación no toma en cuenta factores como el tiempo de residencia de la biomasa en la cámara y la temperatura del proceso fundamental para determinar la distribución de los productos. Una clasificación más adecuada se presenta en la Tabla 3:

Tabla 3. Clasificación de algunos procesos pirolíticos [16, 29].

Proceso	Tiempo de residencia	Tasa de calentamiento	Temperatura final °C	Productos
Carbonización	Días	Muy baja	400	Carbón vegetal
Convencional	5-30min	Baja	600	Carbón, aceite combustible y gas
Rápido	<2s	Muy alta	~500	Aceite combustible
Flash	<1s	Alta	<650	Aceite combustible, químicos, gas
Ultra-rápido	<0,5s	Muy alta	~1000	Químicos, gas
Al vacío	2-30s	Media	400	Aceite combustible
Hidropirólisis	<10s	Alta	<500	Aceite combustible
Metanopirólisis	<10s	Alta	>700	Químicos

Los parámetros de operación de un reactor de pirólisis deben ajustarse a los requerimientos específicos de distribución de productos requeridos. Normas de diseño tentativas sugieren que [16, 29]:

- Para maximizar la formación de carbón vegetal se deben empelar bajas tasas de calentamiento (<0,01-2,0°C/s), una temperatura final baja y largos tiempos de residencia, ver Tabla 3.

- Para maximizar el rendimiento de productos líquidos se deben emplear elevadas tasas de calentamiento y temperaturas finales moderadas (450-600°C) y tiempos de residencia cortos, ver Tabla 3.
- Para maximizar la producción de gas, se deben emplear tasas de calentamiento bajas, temperaturas finales elevadas (700-900°C) y tiempos de residencia grandes, ver Tabla 3.

Según su tipo, los productos de la pirólisis podrían ser implementados en sistemas de generación de electricidad, con generación de vapor en un ciclo Rankine acoplado a un generador, para los sólidos, o una planta termoeléctrica con motor de combustión interna para los líquidos, ver Figura 9.

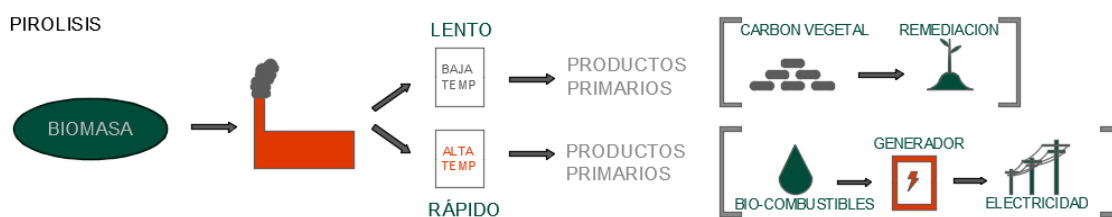


Figura 9. Esquema de generación de energía eléctrica a partir de biomasa mediante pirólisis.

Aunque, la generación de electricidad utilizando los productos de la pirólisis presenta una reducción importante de las emisiones de gases de efecto invernadero [39], el adecuado desempeño de estos sistemas dependerá de la adaptación de los productos de la pirólisis a estos. Por lo tanto, se requiere tratamientos adicionales o diferentes diseños de sistemas termoeléctricos [40].

2. Materiales y métodos

Para analizar el potencial energético de la biomasa en el Ecuador, es necesario identificar la cantidad producida anualmente y la accesibilidad que se tiene hacia estos recursos. Para el año 2014, la producción total de residuos agrícolas en el país se muestra en la Tabla 4 [41]:

Tabla 4. Producción total de residuos agrícolas en el Ecuador para el año 2014 [41].

Cultivo	Producción total de residuos
	t/año
Cacao	1.935.496,50
Banano	4.891.143,60
Plátano	276.473,30
Arroz	2.101.948,90
Caña de azúcar	787.885,9
Maíz	346.002,0
Forestales	136.547,6

La accesibilidad a los recursos de biomasa es complicada de poder determinar, debido a que está en función de algunos factores como la dificultad de cosechar, coleccionar y transportar la biomasa a los centros de conversión energética, así como aspectos políticos y culturales de cada región. Debido a esto, el rango de accesibilidad a los recursos de biomasa es amplio, con valores que oscilan entre el 20-50% dependiendo del tipo de residuo [42-44].

En este estudio, se tomará un valor medio de accesibilidad, es decir, 35%. Tomando en cuenta este dato, la disponibilidad real de biomasa se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Disponibilidad real de la biomasa en el Ecuador.

Cultivo	Producción total de residuos t/año
Cacao	677.423,77
Banano	1.711.900,27
Plátano	96.765,65
Arroz	735.682,13
Caña de azúcar	275.760,08
Maíz	121.100,69
Forestales	47.791,64

Para calcular la energía calórica bruta Q presente en estos residuos, se emplea la siguiente ecuación:

$$Q = m (PCI) \quad \text{Ecuación (1)}$$

En donde m es la masa del residuo y PCI es el poder calorífico inferior. El poder calorífico inferior para los residuos analizados se presenta en la Tabla 6 [41]:

Tabla 6. Poder calorífico inferior de algunos residuos lignocelulósicos [41].

Cultivo	Poder calorífico inferior MJ/kg
Cacao	12,00
Banano	12,63
Plátano	12,63
Arroz	12,00
Caña de azúcar	19,85
Maíz	12,55
Forestales	12,26

Una vez calculado Q , se determina el potencial de generación de energía eléctrica efectivo P , que viene dado por:

$$P = K Q \eta \quad \text{Ecuación (2)}$$

En donde K es un factor de conversión con un valor de 277778 kWh/TJ y η representa el rendimiento global de planta equivalente. Este último parámetro ha sido obtenido para algunos procesos de conversión térmica de biomasa como se indica en la Tabla 7:

Tabla 7. Rendimiento global de planta equivalente para algunos procesos de conversión térmica de biomasa.

Proceso	Rendimiento global de planta equivalente η %
Combustión Directa (CD)	19,9 [41]
Gasificación y Turbina de Gas (GTG)	25 – 28 [45]
Gasificación y Ciclo Combinado (GCC)	35 – 40 [46]
Pirólisis y Ciclo Combinado (PCC)	31 [45]

Además de las variables antes consideradas, se calculará el porcentaje de energía que se emplea para secar la biomasa previo a su aprovechamiento energético:

$$\%Q_{evap} = \frac{Q_{H_2O} \times 100}{Q} \quad \text{Ecuación (3)}$$

En la ecuación (3) Q_{H_2O} corresponde a la energía necesaria para evaporar el agua de cada uno de los residuos.

3. Resultados

El potencial de generación eléctrico efectivo se muestra en la Tabla 8:

Tabla 8. Potencial de generación de energía eléctrica efectivo que se obtiene mediante los procesos de conversión térmica de la biomasa.

Cultivo	Combustión Directa (CD) GWh	Gasificación y Turbina de Gas (GTG) GWh	Gasificación y Ciclo Combinado (GCC) GWh	Pirólisis y Ciclo Combinado (PCC) GWh
Banano	119,5	150,2	210,2	186,2
Arroz	48,8	61,3	85,9	76,1
Cacao	45,0	56,5	79,1	70,0
Caña de azúcar	30,3	38,0	53,2	47,2
Maíz	8,4	10,6	14,8	13,1
Plátano	6,8	8,5	11,9	10,5
Forestales	3,2	4,1	5,7	5,0

A partir de la Tabla 8 se obtiene la Figura 10. En esta se representa el potencial de generación eléctrica efectivo para las cuatro tecnologías de conversión energética de la biomasa analizadas. Las Figuras 11-13 presentan un análisis por separado de las mismas:

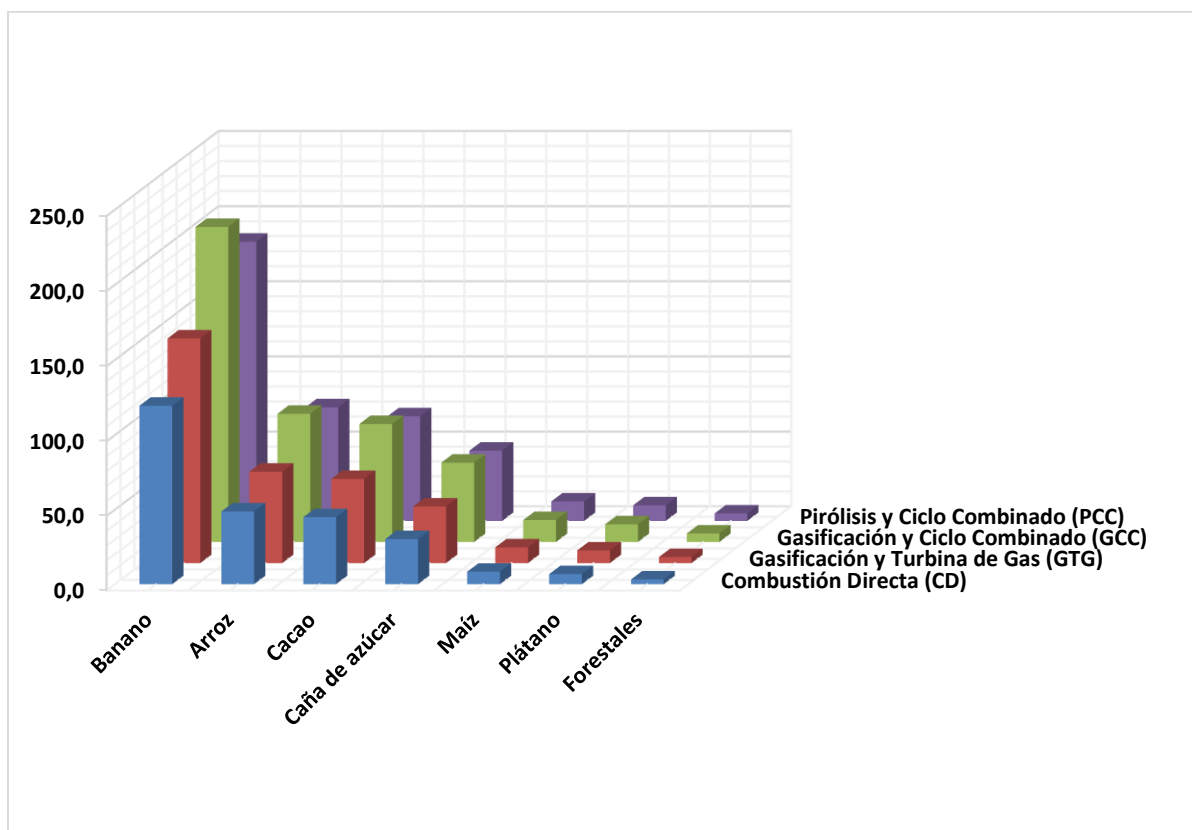


Figura 10. Potencial de generación de energía eléctrica efectiva anual que se obtiene mediante los procesos de conversión térmica de la biomasa en GWh.

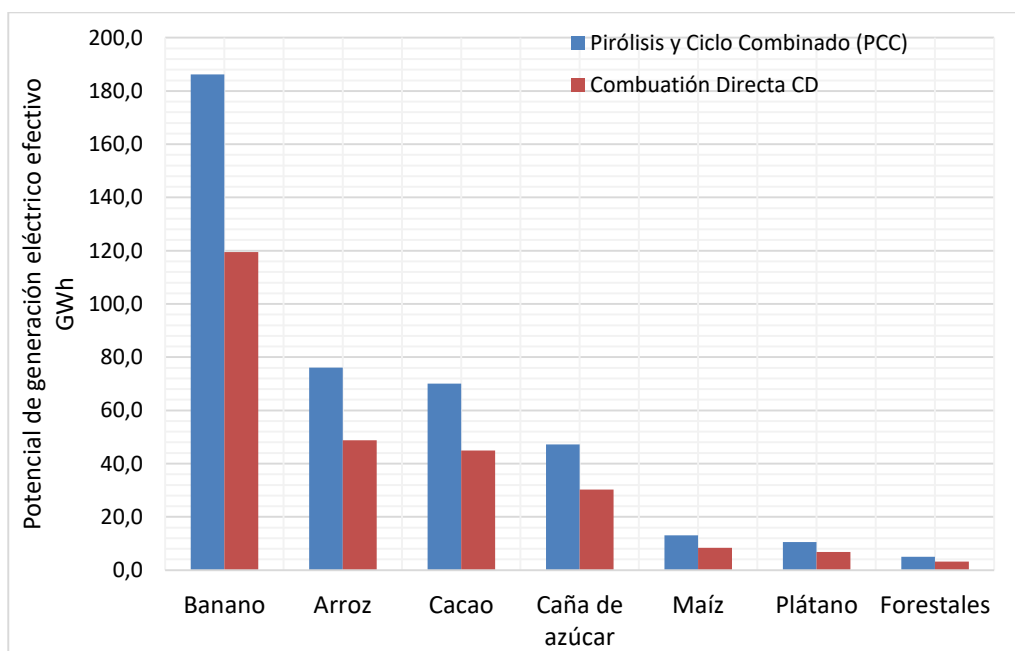


Figura 11. Potencial de generación eléctrica efectiva anual de la biomasa por CD y PCC.

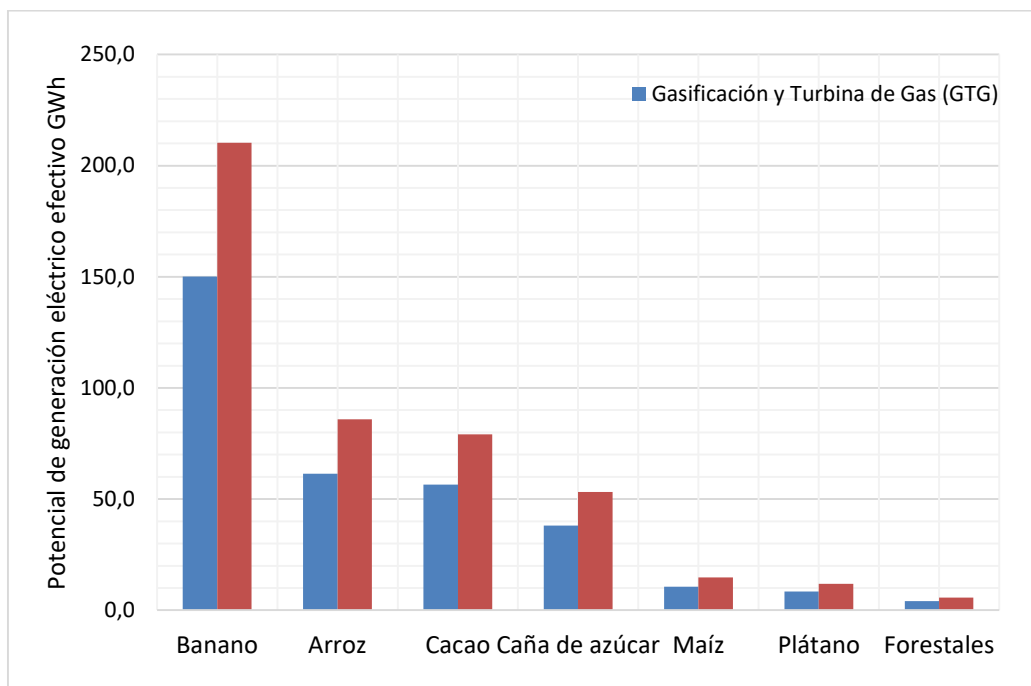


Figura 12. Potencial de generación eléctrico efectivo anual de la biomasa por GTC y GCC.

El porcentaje de energía necesario para evaporar el agua presente en la biomasa, respecto de la energía total que la biomasa posee (Q_{evap}), se presenta a continuación en la Tabla 9:

Tabla 9. Porcentaje de energía necesario para evaporar el agua presente en la biomasa, respecto de la energía total que la biomasa posee (Q_{evap})

Cultivo	Porcentaje Q_{evap} (%)
Cacao	83,73
Banano	79,59
Plátano	79,59
Arroz	6,98
Caña de azúcar	12,66
Maíz	20,02
Forestales	13,66

Con los datos adquiridos durante el cálculo del Q_{evap} se obtiene la Figura 13. Se puede observar el contraste entre la energía bruta contenida en la biomasa y la energía que se requiere para secar la misma de manera forzada.

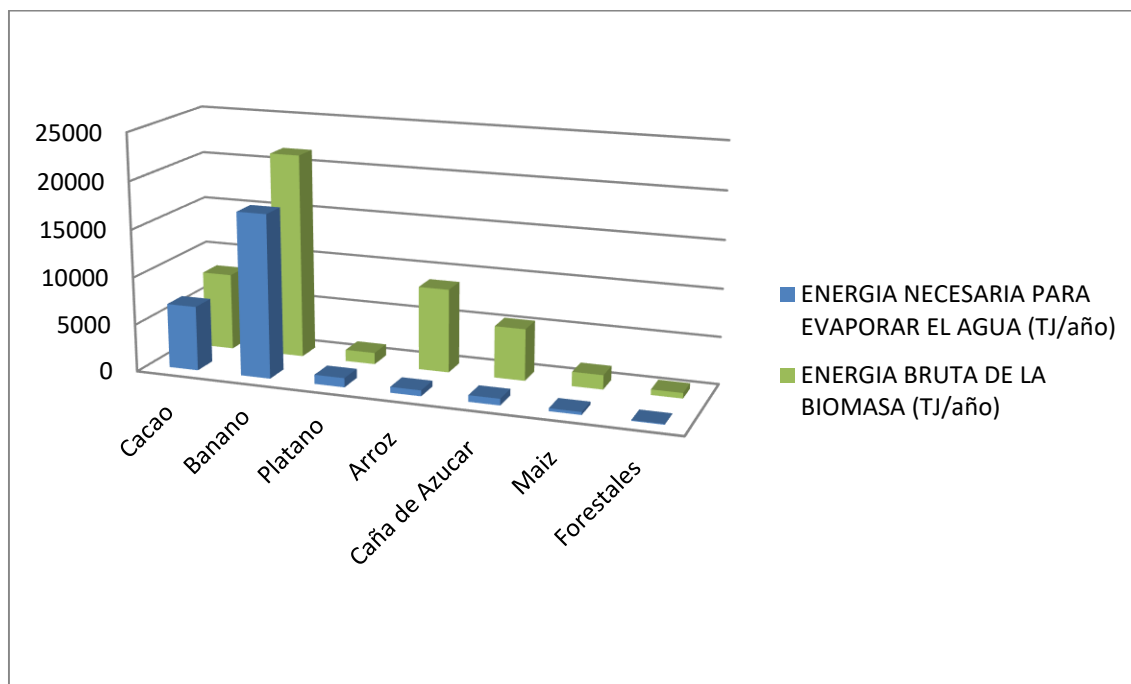


Figura 13. Energía bruta de la biomasa vs energía necesaria para secar la misma.

4. Discusión

En la Figura 10, se observa el potencial de generación de energía eléctrica efectivo para cada tipo de cultivo en función de la tecnología de conversión energética de la biomasa empleada. Se observa que el banano es el cultivo con mayor potencial de generación alcanzando un máximo de aproximadamente 210 GWh anuales mediante gasificación y ciclo combinado GCC. Con respecto a la tecnología de GCC, la gasificación acoplada a un ciclo con turbina de gas GTG presenta un potencial de generación aproximado del 71%, el proceso de pirólisis con ciclo combinado PCC un potencial del 89% y la combustión directa CD un potencial del 57%.

El potencial de generación eléctrico efectivo de los residuos del arroz, cacao y caña de azúcar alcanzan un 41%, 38% y 25% respectivamente en comparación con el potencial de los residuos de la planta de banano. Por otra parte, los residuos forestales, de plátano y maíz presentan un potencial del inferior al 10% con respecto a los residuos de la planta de banano. Esta tendencia se mantiene para las cuatro tecnologías de conversión de biomasa analizadas.

El poder calorífico inferior PCI de la caña de azúcar es 36% más alto en comparación con el PCI del banano y 40% más elevado con respecto al PCI del cacao y el arroz. A pesar de esto, la cantidad de residuos disponibles de la caña de azúcar representan tan solo un 16% comparados con los residuos de la planta de banano y aproximadamente un 40% en relación con los residuos del cacao y el arroz. Estas diferencias se ven reflejadas en el potencial de generación de energía eléctrica efectivo, Figuras 11-12, para cada una de las tecnologías. Esto sugiere que el proceso de conversión óptimo de la biomasa será aquel que ofrezca un mayor rendimiento térmico como compensación por bajos poderes caloríficos aprovechando así la gran cantidad de residuos disponibles.

Un aspecto importante a considerar es la sostenibilidad de la producción de energía eléctrica, relacionada directamente con la naturaleza permanente o transitoria de los

cultivos. Para el caso puntual del cultivo de arroz y por tanto de la biomasa procedente de sus residuos, se debe diseñar un sistema de conversión energética que considere la naturaleza transitoria de este, o en su defecto que se acople a otros tipos de biomasa como los residuos de cacao o caña de azúcar, con el fin de mantener una generación eléctrica estable.

Con respecto a las tecnologías de conversión térmica de la biomasa, los resultados presentados en la Figura 10 muestran que los procesos de conversión que incluyen ciclos combinados ofrecen mayor potencial de generación de energía eléctrica debido a su mayor eficiencia térmica. No obstante, el costo de estas instalaciones es significativamente mayor [45], a lo que debe sumarse los costos de acondicionamiento de la biomasa antes de su ingreso al proceso en función de las necesidades específicas de cada una de las tecnologías de conversión energética. Sin embargo, todos estos procesos representan una oportunidad de inversión rentable si se garantiza un suministro estable de biomasa [47].

El transporte de biomasa a los centros de pretratamiento y procesamiento es crucial debido al tiempo en el que esta empieza a cambiar su composición. Esto dependerá ciertamente del tipo de biomasa y de la cantidad que se genere. Actualmente en el Ecuador se estudian varias aplicaciones energéticas no solo para la generación de energía eléctrica sino también para reemplazar combustibles utilizados en el transporte, aprovechando la biomasa de diferentes cultivos agroforestales como son: banano, arroz, cacao, café, palmito, piñon. La tecnología de conversión energética más ampliamente utilizada es la combustión. Residuos agrícolas como la cascarilla de arroz o el bagazo de caña son empleados para la producción de calor, que es aprovechado dentro de los mismos emplazamientos en donde se procesan los cultivos agrícolas [1, 2].

Un ejemplo de utilización de biomasa con fines energéticos en Ecuador es el ingenio San Carlos, el mismo que ha implementado un sistema de cogeneración utilizando la biomasa residual de la caña de azúcar, cubriendo así sus necesidades energéticas e inyectando a la red eléctrica nacional el excedente de energía generada. Este sistema aprovecha el vapor de alta presión mediante un turbogenerador de 43 MW que además de generar energía, entrega vapor de baja presión para el proceso de fabricación de azúcar [48].

La generación de biomasa en el país es dispersa y variante dependiendo del cultivo, de manera que es necesario ampliar este estudio hacia la optimización de toda la cadena de suministro con el objetivo de encontrar la mejor configuración de sistemas que permitan aprovechar la biomasa ya sea, “in situ” o mediante un sistema de transportación y almacenamiento adecuado para evitar su degradación y por ende pérdida de propiedades que afectarían a su desempeño energético.

El pretratamiento de la biomasa podría suponer un problema que necesitaría ser solucionado si se desea implementar cualquiera de las tecnologías que se han analizado en este documento, puesto que si se realiza un secado forzado de la misma, el consumo energético es muy elevado. En la Tabla 9, se observa que los porcentajes de energía necesaria para este proceso, respecto de la energía bruta de la biomasa, van desde 83% para el caso del cacao hasta un 79% para el plátano y el banano, lo cual haría que emplear estas biomásas en estos procesos sea poco rentable en términos energéticos, si el secado fuera forzado. Si se empleara el secado natural, se podría implementar las tecnologías previamente analizadas sin inconveniente. Al contrario, en el caso de biomásas como el maíz 20%, residuos forestales 14%, bagazo de caña 12% y cascarilla de arroz 7%, estos procesos de aprovechamiento energético serían viables.

5. Conclusiones

En el presente estudio se analizó el potencial de generación eléctrica efectivo a partir de biomasa en el Ecuador. El banano, al presentar la mayor cantidad de residuos producidos por año, produjo los mayores potenciales de generación: 119,5 GWh mediante combustión directa CD, 150,3 GWh por medio de gasificación y turbina de gas GTG, 201,2 GWh a través de gasificación y ciclo combinado GCC, y 186,2 GWh mediante pirólisis y ciclo combinado PCC. El potencial de generación eléctrico efectivo de residuos provenientes del arroz, cacao y caña de azúcar alcanzaron un 41%, 38% y 25% respectivamente en comparación con el potencial de los residuos de la planta de banano. Los residuos forestales, de maíz y plátano presentaron potenciales inferiores al 10%. El proceso de gasificación y ciclo combinado, empleando los residuos de la planta de banano, produjo el mayor potencial de generación de energía eléctrica efectiva. Con respecto a la tecnología GCC y al mismo tipo de residuos, la gasificación acoplada a un ciclo con turbina de gas presentó un potencial de generación aproximado del 71%, el proceso de pirólisis con ciclo combinado un potencial del 89% y la combustión directa un potencial del 57%, lo que evidencia que los procesos de conversión térmica acoplados a ciclos combinados presentan mayores potenciales de generación de energía eléctrica debido a su mayor eficiencia térmica.

En general, se estableció que los residuos provenientes de los cultivos como banano, cacao, caña de azúcar y arroz presentan potenciales prometedores de generación de energía eléctrica a través de procesos de conversión energética como GCC y GTG. Sin embargo, también es necesario enfatizar que el potencial de generación de energía eléctrica está condicionado a aspectos como: a) la naturaleza permanente o transitoria del cultivo debido a la necesidad de garantizar un suministro energético estable, que puede preferentemente ser obtenido por la combinación de los diferentes tipos de residuos, b) los costos del pre-tratamiento que requieren los diferentes tipos de biomasa antes de ingresar a los procesos de GCC y GTG y c) el costo de las instalaciones, que es elevado para procesos que emplean ciclos combinados.

El alto contenido de humedad de los residuos agrícolas procedentes de cultivos como el cacao, el banano y el plátano disminuiría la eficiencia de las tecnologías de conversión energética antes analizadas, debido a la utilización de un porcentaje de la energía bruta disponible en la biomasa para cuando el secado es forzado. Por el contrario, cuando los residuos sean secados empleando energías alternativas, la eficiencia de los procesos energéticos se incrementaría proporcionalmente al ahorro energético debido al secado.

Los resultados de este estudio servirán de base para un posterior análisis tecno-económico, que permitirá determinar la relación costo-beneficio de las tecnologías presentadas mediante el cálculo e integración de los costos antes mencionados.

Referencias

- [1] I. N. d. P. d. Ecuador, "Atlas Bioenergético del Ecuador," p. 150, 2014.
- [2] E. J. Pelaez Raul, *Energías Renovables en el Ecuador. Situación Actual, Tendencias y Perspectivas*, Primera edición ed., 2015.
- [3] S. E. Hosseini and M. A. Wahid, "Utilization of palm solid residue as a source of renewable and sustainable energy in Malaysia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 621-632, 2014.
- [4] S. Gerssen-Gondelach, D. Saygin, B. Wicke, M. K. Patel, and A. Faaij, "Competing uses of biomass: assessment and comparison of the performance of bio-based heat, power, fuels and materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 964-998, 2014.

- [5] A. Bauen, G. Berndes, M. Junginger, M. Londo, F. Vuille, R. Ball, *et al.*, "Bioenergy: a sustainable and reliable energy source. A review of status and prospects," *Bioenergy: a sustainable and reliable energy source. A review of status and prospects.*, 2009.
- [6] D. Delgado, "Balance Energético Nacional 2015," ed: Quito-Ecuador, 2015.
- [7] S. N. d. P. y. Desarrollo, "Plan Nacional del Buen Vivir," *SN Desarrollo, Plan Nacional del Buen Vivir. Quito*, 2013.
- [8] A. Tanksale, J. N. Beltramini, and G. M. Lu, "A review of catalytic hydrogen production processes from biomass," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 166-182, 2010.
- [9] B. Kamm, P. R. Gruber, and M. Kamm, "Biorefineries-industrial processes and products," *Biorefineries industrial processes and products. Wiley-VCH, Weinheim*, 2006.
- [10] Y. Yu, X. Lou, and H. Wu, "Some recent advances in hydrolysis of biomass in hot-compressed water and its comparisons with other hydrolysis methods†," *Energy & Fuels*, vol. 22, pp. 46-60, 2007.
- [11] B. Kamm, P. R. Gruber, and M. Kamm, *Biorefineries—industrial processes and products*: Wiley Online Library, 2007.
- [12] S. Sarkar and B. Adhikari, "Lignin-modified phenolic resin: synthesis optimization, adhesive strength, and thermal stability," *Journal of adhesion science and technology*, vol. 14, pp. 1179-1193, 2000.
- [13] G. W. Huber and J. A. Dumesic, "An overview of aqueous-phase catalytic processes for production of hydrogen and alkanes in a biorefinery," *Catalysis Today*, vol. 111, pp. 119-132, 2006.
- [14] A. Carroll and C. Somerville, "Cellulosic biofuels," *Annual review of plant biology*, vol. 60, pp. 165-182, 2009.
- [15] D. L. Klass, *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*: Academic press, 1998.
- [16] C. Stevens and R. C. Brown, *Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power*: John Wiley & Sons, 2011.
- [17] M. Camps and F. Marcos, "Los biocombustibles," *Mundi-Prensa Libros, Madrid*, 2008.
- [18] L. Ortíz, A. Tejada, A. Vázquez, and G. P. Veiras, "Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria," *Revista CIS-Madera. Parte III Producción de elementos densificados*, pp. 17-32, 2004.
- [19] A. Demirbas, "Combustion of biomass," *Energy sources, Part A: Recovery, utilization, and environmental effects*, vol. 29, pp. 549-561, 2007.
- [20] T. Nussbaumer, "Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction," *Energy & fuels*, vol. 17, pp. 1510-1521, 2003.
- [21] K. Hein and J. Bemtgen, "EU clean coal technology—co-combustion of coal and biomass," *Fuel processing technology*, vol. 54, pp. 159-169, 1998.
- [22] N. Peters and B. Rogg, *Reduced kinetic mechanisms for applications in combustion systems* vol. 15: Springer Science & Business Media, 2008.
- [23] R. P. Overend, "Thermochemical conversion of biomass," *Renewable Energy Sources Charged with Energy from the Sun and Originated from Earth-Moon Interaction, Evald E. Shpilrain ed., in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), developed under the Auspices of the UNESCO. Eolss Publishers, Oxford*, 2004.
- [24] S. Dasappa, "Thermochemical Conversion of Biomass," *Transformation of Biomass: Theory to Practice*, pp. 133-157, 2014.
- [25] T. Damartzis and A. Zabaniotou, "Thermochemical conversion of biomass to second generation biofuels through integrated process design—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 366-378, 2011.
- [26] C. Borgnakke and R. E. Sonntag, *Fundamentals of thermodynamics*: Wiley Global Education, 2016.
- [27] R. Van den Broek, A. Faaij, and A. van Wijk, "Biomass combustion for power generation," *Biomass and Bioenergy*, vol. 11, pp. 271-281, 1996.
- [28] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies," *Bioresource technology*, vol. 83, pp. 47-54, 2002.
- [29] P. Basu, *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*: Academic press, 2010.
- [30] A. Pandey, *Biofuels: alternative feedstocks and conversion processes*: Academic Press, 2011.
- [31] J. Rezaian and N. P. Cheremisinoff, *Gasification technologies: a primer for engineers and scientists*: CRC press, 2005.
- [32] W. De Jong, *Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future*: Wiley, 2014.
- [33] A. V. Bridgwater, "Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass," *Chemical Engineering Journal*, vol. 91, pp. 87-102, 2003.
- [34] Y. Chhiti and M. Kemiha, "Thermal Conversion of Biomass, Pyrolysis and Gasification," *International Journal of Engineering and Science (IJES)*, vol. 2, pp. 75-85, 2013.

- [35] J. Ruiz, M. Juárez, M. Morales, P. Muñoz, and M. Mendívil, "Biomass gasification for electricity generation: review of current technology barriers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 174-183, 2013.
- [36] J. V. Kumar and B. C. Pratt, "Determination of calorific values of some renewable biofuels," *Thermochimica Acta*, vol. 279, pp. 111-120, 1996.
- [37] C. Di Blasi, "Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, pp. 47-90, 2008.
- [38] S. Yaman, "Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks," *Energy conversion and management*, vol. 45, pp. 651-671, 2004.
- [39] J. Fan, T. N. Kalnes, M. Alward, J. Klinger, A. Sadehvandi, and D. R. Shonnard, "Life cycle assessment of electricity generation using fast pyrolysis bio-oil," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 632-641, 2011.
- [40] D. Chiaramonti, A. Oasmaa, and Y. Solantausta, "Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 11, pp. 1056-1086, 2007.
- [41] M. d. E. y. E. Renovable, "Atlas Bioenergético del Ecuador " 2014.
- [42] F. Rosillo-Calle and J. Woods, *The biomass assessment handbook: bioenergy for a sustainable environment*: Earthscan, 2012.
- [43] J. A. Anaya, E. Chuvieco, and A. Palacios-Orueta, "Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach," *Forest Ecology and Management*, vol. 257, pp. 1237-1246, 2009.
- [44] V. Dornburg, A. Faaij, P. Verweij, M. Banse, K. v. Diepen, H. v. Keulen, *et al.*, "Biomass assessment: assessment of global biomass potentials and their links to food, water, biodiversity, energy demand and economy: inventory and analysis of existing studies: supporting document," ed: MNP, 2008.
- [45] A. Ganesh and R. Banerjee, "Biomass pyrolysis for power generation—a potential technology," *Renewable Energy*, vol. 22, pp. 9-14, 2001.
- [46] A. Franco and N. Giannini, "Perspectives for the use of biomass as fuel in combined cycle power plants," *International journal of thermal sciences*, vol. 44, pp. 163-177, 2005.
- [47] K. R. Craig and M. K. Mann, *Cost and performance analysis of biomass-based integrated gasification combined-cycle (BIGCC) power systems*: National Renewable Energy Laboratory Golden, CO, 1996.
- [48] I. S. Carlos. (2012). *Inauguración de la Segunda Etapa del Proyecto de Cogeneración Eléctrica del Ingenio San Carlos*.