

Evaluación financiera de generación eléctrica de 2 MW a partir de biomasa forestal en Costa Rica

Financial evaluation of 2 MW electricity generation from forest biomass in Costa Rica

Jerson González¹ • Carlos Roldán² • Dagoberto Arias³  • Juan Carlos Valverde³  • Diego Camacho⁴ 

Abstract

The implementation of biomass as an energy source in Costa Rica has been promoted in the last decade due to the increase of fossil fuels and climatic variations that have decreased hydropower energy production, increasing the kilowatt cost per hour in the market. Therefore, this study analyzes the financial viability of 2 MW generation from forest biomass. The study evaluated the best electric generation system with biomass (direct combustion and gasification), the source of optimal biomass supply (self-generation, market or mixed purchase) and the financial feasibility of energy produced in two scenarios (selling electricity to ICE and self-consumption). The implementation of vertical type gasifiers (downdraft) showed greater viability due to its high efficiency, low waste generation and less biomass consumption over time; on the other hand, it was determined that the best source for biomass supply is purchasing in the domestic market (40 USD/ton dry biomass) due to its current low cost of acquisition; however it would be advisable in the long-term to have a mixed system (self-supply and market purchase) to have less dependence on the market price changes. Finally, financial analysis showed viability for consumption generation (ranging from 5 %, TIR of 17.68 % and RB/C of 1.82), whereas energy production with the intent of selling it to ICE was not found viable (VAN of -2.0 %, TIR of -21.15% and R B/C of 1.07) due to the low energy purchase value of this entity.

Key words: Energy, biomass, financial feasibility, VAN, TIR, downdraft.

1. Consultor independiente; San José, Costa Rica; gonzalez.jerson@gmail.com

2. Escuela de Química, Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica; croldan@tec.ac.cr

3. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica; darias@tec.ac.cr; jcvalverde@tec.ac.cr

4. Programa de Regionalización Interuniversitaria, CONARE; Cartago, Costa Rica; dicamacho@tec.ac.cr

Recibido: 19/07/2017

Aceptado: 01/06/2018

Publicado: 19/09/2018

DOI: 10.18845/rfmk.v15i1.3709

Resumen

La implementación de biomasa como fuente energética en Costa Rica se ha impulsado en la última década debido al aumento de los combustibles fósiles y variaciones climáticas que han disminuido la generación energía hidroeléctrica, incidiendo en el aumento del costo del kilowatt hora en el mercado; por lo cual este estudio analizó la viabilidad financiera de generación de 2 MW a partir de biomasa arborea. El estudio evaluó el mejor sistema de generación eléctrica con biomasa (combustión directa y gasificación), la fuente de abastecimiento de biomasa óptima (autogeneración, compra en el mercado o mixto) y la factibilidad financiera de la energía producida en dos escenarios (venta electricidad al ICE y autoconsumo). Encontrando que la implementación de gasificadores de tipo vertical (“*downdraft*”) mostraron mayor viabilidad debido a su alta eficiencia, poca generación de residuos y menor consumo de biomasa en el tiempo; por otra parte se determinó que la mejor fuente de abastecimiento de biomasa es con la compra en el mercado nacional (40 USD/ton seca) debido su bajo costo actual de adquisición, sin embargo sería recomendable en el largo plazo disponer un sistema mixto (autoabastecimiento y compra en el mercado) para disponer menor dependencia a los cambios de precios en el mercado. Finalmente, los análisis financieros mostraron viabilidad de generación para autoconsumo (VAN de 5 %; TIR de 17,68 % y RB/C de 1,82), en cambio para venta de energía al ICE no se encontró viabilidad (VAN de -2,0 %; TIR de -21,15 % y R B/C de 1,07) debido al bajo valor de compra energética de esta entidad.

Palabras clave: Energía, biomasa, factibilidad financiera, VAN, TIR, *downdraft*.

Introducción

En las últimas décadas la demanda energética mundial ha mostrado un aumento continuo producto del incremento de la densidad poblacional humana, automatización de los sistemas de producción y el auge de las economías emergentes (Pérez y García, 2013). Con el aumento del consumo energético se ha incrementado la demanda de fuentes de producción, siendo las energéticas no renovables (combustibles fósiles, carbón mineral y gas natural) las que han dominado cerca del 80 % del mercado energético mundial; en cambio las fuentes renovables de bajo impacto apenas acaparan el 20 % del mercado (Pérez y García, 2013; Bilgili et al. 2017). Ante tal panorama se genera como consecuencia una mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, entre otros) que inciden directamente en el cambio del clima (Del Val Gento y Antolín, 2009).

Para disminuir la dependencia de fuentes energéticas no renovables y disminuir la generación de gases de alta contaminación, en la última década se ha incentivado la investigación y el desarrollo de tecnologías de producción energética con fuentes renovables de bajo impacto (Cardona et al., 2016). Estas nuevas tecnologías de producción deben estar sustentadas bajo tres principios, según los estudios de Ma et al. (2017) y Peter et al. (2017): i. Sustentable en el tiempo (debe ser un recurso natural disponible a largo plazo), ii. Replicable a nivel mundial (capacidad de ser adaptable y funcional en varias partes del planeta) y iii. Financieramente rentable (con costos de producción energética compatible a otras fuentes disponibles en el mercado); este último factor ha sido la mayor limitante en la generación de energías limpias a gran escala; Kim y Park (2016) mencionan que se debe al alto costo tecnológico y baja eficiencia productiva.

Entre las tecnologías renovables que han mostrado mejor eficiencia y factibilidad financiera se destacan la solar, eólica, hidráulica y la biomasa vegetal (Kirkels y Verbong, 2011). Esta última fuente según Arteaga et al. (2015), es abundante con alto potencial de producción energética debido a su constante proceso de regeneración; pero con aspectos limitantes como los costos de extracción, transporte y de manipulación que varían significativamente según la especie implementada, las condiciones geográficas y particularidades de cada país (Mckendry, 2002).

En el caso específico de Costa Rica, se ha propuesto la generación de energía a partir de biomasa vegetal con la finalidad de autoconsumo (Cortés, 2009) que permite disminuir la dependencia a la energía térmica generada a partir de combustibles fósiles que representa el 20 % de la fuente energética nacional (Kowollik, 2014). También, en el Plan Nacional de Energía 2015-2030 (MINAE, 2015) se considera dentro de la matriz eléctrica la generación eléctrica a partir de biomasa, mencionando directamente a la gasificación y la combustión directa como los principales mecanismos de generación eléctrica.

El proceso de combustión directa es un proceso simple que se lleva a un sólido o líquido a temperaturas superiores de 80 °C y se genera su combustión, siendo el calor implementado como la fuente de generación eléctrica, presentando ventajas como la utilización generalista de materia prima (cualquier material con características flamables), con contenido de humedad inferior al 40 % y con un conocimiento aplicativo amplio en el país; sin embargo, se tienen limitaciones en cuanto a la eficiencia y generación una gran de cantidad de compuestos contaminantes como el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y radicales libres (Pérez y Osorio, 2014).

En contraste, la gasificación es un proceso de combustión con ausencia parcial de oxígeno (McKendry, 2002; Pérez y Osorio, 2014), donde el principal producto del proceso se denomina “syngas” que está compuesto por CO, H₂ y CH₄ y en menores cantidades CO₂ (Melgar et al., 2007). El “syngas” se combustiona entre 700 y 1200 °C generando en el proceso calor y nuevos gases que pueden ser empleados en otros procesos de combustión (Saint-Marc, 2015), con la ventaja que es un sistema que optimiza el poder calórico de la materia prima que emplea ya que la fracciona y genera combustiones múltiples que permitan aumentar la generación eléctrica, pero con la desventaja que el proceso es complejo y requiere equipos especializados (Ma et al., 2007).

Es importante destacar que en Costa Rica no se han generado experiencias con gasificación a mayor escala como mecanismo de transformación de energía. Por lo cual es necesario evaluar diferentes factores tales como: la disponibilidad actual de biomasa en el mercado nacional, las características óptimas del material en conjunto selección de tecnología de generación eléctrica óptima para Costa Rica. Se estableció como objetivo en el presente estudio analizar la rentabilidad financiera de un proceso de gasificación de biomasa forestal para la generación eléctrica de 2 MW bajo dos escenarios de venta de energía.

Materiales y métodos

Determinación de la tecnología óptima para la generación eléctrica

Se desarrolló un análisis comparativo de los dos sistemas termo-químicos disponibles para la generación eléctrica a partir de biomasa: gasificación y combustión directa. La determinación del proceso adecuado para Costa Rica se definió con los siguientes criterios: eficiencia del proceso, porcentaje de residuos, generación de subprocesos (definido como potenciales usos de los residuos o excedentes que genera la combustión directa o gasificación), contaminación gaseosa del proceso, disponibilidad tecnológica y costo de adquisición.

Posterior a la selección del proceso de generación eléctrica, se caracterizó el equipo óptimo siguiendo la metodología propuesta por Pérez y Osorio (2014) que consistió en la eficiencia del equipo, tipo de biomasa óptima, consumo de biomasa en el tiempo y caracterización de los productos energéticos del sistema (voltaje y frecuencia eléctrica).

Requerimientos de abastecimiento de biomasa

El estudio analizó tres escenarios de abastecimiento de biomasa:

1. Compra de biomasa en el mercado nacional: se simuló la compra de biomasa bajo el precio de mercado nacional (40 USD/ton), con características: un contenido de humedad inferior al 30 %, con un tamaño de astillas inferior a 40 mm de longitud y mezclas de *T. grandis* y *G. arborea*, esto último sustentado en estudios desarrollados por Salazar (2016) que encontró que los residuos de ambas especies han mostrado un mayor potencial de inclusión en el mercado energético debido a la gran cantidad de proyectos de reforestación presentes en el país en conjunto a sus propiedades calóricas.
2. Desarrollo de plantaciones dendroenergéticas de autoabastecimiento: se simuló el uso del material procedente de plantaciones de *Eucalyptus saligna* con una densidad de establecimiento de 10 000 árb/ha y un turno de cosecha a 3 años; se asumió un costo de establecimiento de 3 000 USD/ha con el mantenimiento anual de 600 USD/ha, según menciona Murillo et al. (2017) para cultivos de esta especie en Costa Rica con una cosecha de biomasa seca de 45 ton/ha y un costo de producción de 50 USD/ton.
3. Consumo mixto, que consistió una mezcla del sistema con 50 % de biomasa adquirida en el mercado y otro 50 % de biomasa obtenida de autoabastecimiento siguiendo los criterios anteriormente planteados.

La escogencia de la mejor fuente de biomasa utilizó los criterios de Wang et al. (2016) para la selección de las materias primas óptimas, este es un criterio que califica cada variable con valores del 1 al 10 (1 valor mínimo y 10 valor máximo) basado en los siguientes criterios:

- Precio: costo de adquisición u obtención de la materia prima lista por tonelada.
- Disponibilidad: facilidad de adquisición de la materia prima en el mercado regional.
- Homogeneidad: uniformidad en especie, tamaño de partícula, humedad de la materia prima a requerir.
- Operación: simplicidad de la manipulación y operación (transporte y almacenamiento) de la materia prima.
- Conforme el valor ponderado de dichos criterios fuese mayor, la viabilidad de la implementación de dicha materia prima es directamente proporcional.

Análisis Financiero

El análisis financiero se basó primeramente en la escogencia de la mejor tecnología de generación energética y fuente de abastecimiento de biomasa que se definió a partir de los puntos metodológicos anteriores, además se consideraron los siguientes puntos en la evaluación financiera, los cuales se aplicaron para dos escenarios económicos: (i) Venta

de la energía al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y (ii) Autogeneración para abastecimiento de las organizaciones; todos los supuestos se manejaron en dólares norteamericanos (USD):

- El equipo a implementar tiene una vida útil de 10 años.
- Se tendrá un financiamiento externo del 80 % con una tasa de interés nominal anual del 5,5 % sobre saldos.
- Se estableció un periodo de gracia de 12 meses.
- La inversión consideró: la compra de equipo, la instalación, la conexión y rehabilitación eléctrica y la operación del equipo considerando todos los costos operativos y de insumos para que el equipo entre en funcionamiento.
- Se asumió precio de venta eléctrico en el mercado de 0,16 USD/kWh.

El análisis financiero implementó tres indicadores: (i) Valor anual neto (VAN), (ii) Tasa Interna de Retorno (TIR) y la Relación Beneficio-Costo (B/C). El VAN es la actualización de la diferencia de los cobros y pagos de un proyecto o inversión. Para ello trae todos los flujos de caja al momento presente descontándolos a un tipo de interés determinado (Kim y Park, 2016) tal como se presenta en la ecuación 1.

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{V}{(1+k)^t} - I_0 \quad (1)$$

Donde: VAN es el Valor Actual Neto; V es los valores netos de los flujos de caja; I_0 es el valor de la inversión inicial y k es el tipo de interés.

En cuanto al TIR que se define como la media geométrica de los rendimientos futuros esperados de dicha inversión, y que implica por cierto el supuesto de una oportunidad para reinvertir y se calculó con la ecuación 2.

$$TIR = \sum_{i=1}^n VPCi \quad (2)$$

Donde: TIR es la Tasa Interna de retorno; VPCI es la sumatoria en valor presente del diferencial de los costos e ingresos e inversión del proyecto.

Finalmente, en la Relación beneficio costo (B/C) se definió como la división de los ingresos entre lo egresos en tiempo presente, conforme el valor obtenido sea mayor a cero, la viabilidad del proyecto sería mayor debido a que los ingresos son mayores que los egresos; en cambio valores de B/C negativos los egresos son mayores a los ingresos y con ello la viabilidad del proyecto es negativa.

Resultados y discusión

Determinación de la tecnología óptima de generación eléctrica

En Costa Rica se identificó que el 45 % de las empresas que consumen más de 2 MW de energía han desarrollado programas de autoconsumo energético, implementado la combustión directa en un 82 %, específicamente con el uso de calderas de combustión; seguido por la de generación eléctrica a partir de gasificación con el 12 % y el 6 % remanente con otros procesos termo-químicos.

La tecnología de mayor implementación en Costa Rica para la combustión directa ha sido la caldera que consiste de un dispositivo de tipo cámara a presión donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable (Estrada y Meneses, 2004), es un sistema que se caracteriza por ser relativamente simple (cuadro 1), pero que requiere sistemas completos de filtrado de gases para disminuir la concentración de contaminantes que tienen un impacto significativo en el ambiente y que pueden afectar directamente la salud humana (Pérez et al., 2010); además es un sistema con una eficiencia inferior al 60 % y que requieren un sistema de manejo de residuos (alquitranes y cenizas) amplio y es debido a los volúmenes de biomasa consumidos que generan entre un 5 a 15 % de residuos, que deben ser evacuados de manera continua de la cámara de la caldera, conforme aumente su presencia en la cámara la eficiencia de la caldera se disminuiría (Melgar et al., 2007).

En el caso de la gasificación (cuadro 1), el modelo más utilizado es el gasificador de tipo vertical (“Downdraft”), el cual funciona con un proceso de fraccionamiento de calor que disminuye entre un 30 y 40 % la generación de gases contaminantes producto del bajo porcentaje de oxígeno presente en la cámara y las temperaturas superiores a los 700 °C en conjunto a un sistema de filtrado de alta depuración; con una eficiencia de generación eléctrica superior al 75 % (en función de la materia prima de combustión) (Caputo et al., 2005) y una generación de residuos tipo alquitranes y cenizas inferior al 10 % que según Suzuki et al. (2017), se considera un valor excelente debido a que la limpieza y el manejo del equipo es más simple y con un costo menor.

Con respecto a la disponibilidad de la tecnologías y su costo de adquisición a nivel nacional, ambas tecnología están disponibles en el mercado internacional y usualmente son importadas de Asia, Norte América y Europa; la tecnología de gasificación muestra valores de mercado 20 % menores a los equipos de combustión directa debido a: los sistema de filtración es de un costo mayor y por los costos de transporte; además, Frenchun (2006) menciona que costos iniciales de inversión de equipo pueden afectar directamente la rentabilidad

Cuadro 1. Análisis comparativo de proceso de generación energética a partir de biomasa vegetal por combustión directa y gasificación.

Table 1. Comparative analysis of the energy generation process from vegetable biomass by direct combustion and gasification.

Criterio	Proceso Combustión directa	Proceso de Gasificación
Eficiencia del proceso* (%)	30 - 60	55 - 85
Porcentaje de residuos* (%)	5 - 15	5 - 8
Sub productos	Cenizas	Gas metano e hidrógeno
Contaminación gaseosa	CO, CO ₂ , NOx, SOx	CO, CO ₂ , H ₂ , H ₂ O
Disponibilidad tecnológica en el país	Disponible mediante contrapedido	Disponible mediante contrapedido
Costo aproximado de adquisición (USD)	400 000 - 750 000	5 500 000 - 1 000 000

*Porcentaje con respecto al volumen de biomasa introducido al proceso energético.

* Percentage with respect to the volume of biomass introduced to the energy process.

Cuadro 2. Características óptimas de un gasificador con capacidad de generación eléctrica de 2 MW a partir de residuos de biomasa vegetal.

Table 2. Optimal characteristics of a gasifier with 2 MW electricity generation capacity from vegetable biomass residues.

Criterio	Requerimiento del gasificador
Eficiencia del equipo (%)	60 - 85
Tipo y tamaño de la biomasa	Astillas de madera con tamaño inferior a 4 cm de longitud, compatible a pellets
Contenido Humedad de la biomasa (%)	Inferior a 30
Consumo de biomasa (kg/h)	2 400
Voltajes y frecuencia eléctrica generada	120/240 v; a 50 o 60 Hz, en una, dos o tres fases.

de los proyectos de generación eléctrica de baja y mediana generación, debido a que se requiere un mayor tiempo para recuperar la inversión y una dependencia a la eficiencia de la generación del sistema, algo que la combustión directa es menor que la gasificación. Con los elementos anteriores se consideró que el proceso de gasificación es el óptimo en el país.

Al analizar el equipo de gasificación óptimo para la generación de 2 MW de electricidad (cuadro 2), se caracteriza por tener una eficiencia del 60 al 85 % al utilizar madera con un contenido de humedad inferior al 30 % en presentación de astilla o "pellets". Con un consumo diario de 2 400 kg para generación eléctrica en 120 o 240 voltios a frecuencias de 50 a 60 Hz.

Requerimiento de biomasa

Se determinó que para la operación óptima del gasificador seleccionado se requiere un consumo diario de 57,6 ton de biomasa seca (cuadro 3), equivalentes a un consumo anual de 20 966,4 ton. Al analizar el costo de adquisición de biomasa obtenida en el mercado nacional mostró un costo diario de 2 304 USD, con el escenario mixto el costo fue de 2 585 USD/día (12,2 % más cara) y el de autoabastecimiento con 2 880 USD/día

(25 % mayor); la diferencia de costos se debió a que en el mercado nacional el precio es aún bajo debido que los residuos proceden del aprovechamiento de plantaciones forestales y sistemas agroforestales que en los sistemas tradicionales tiene un valor mínimo debido su uso limitado, lo cual abarata costos que se ven limitados a las actividades operativas de extracción y manejo de la biomasa (Kim y Park, 2016).

Wang et al. (2017) mencionan que si bien el sistema de comprar la biomasa en el mercado local disminuye el costo de generación eléctrica en el corto plazo, presenta limitaciones en cuanto a la dependencia de la oferta de biomasa y de aspectos logísticos (cosecha, secado y transporte). Por su parte, Balderrama et al. (2011) afirman que los modelos mixtos disminuyen no solo la dependencia al mercado, sino que aumentan la capacidad de asimilación de problemas de abastecimiento o disminución de la oferta de biomasa en el mercado, ya que disponer de plantaciones propias permite crear capacidad de respuesta en caso de aumento en la generación eléctrica. Para el caso autoabastecimiento, mostró los mayores costos, aquí se debe aclarar que es influenciada su rentabilidad por los bajos costos de venta en el mercado y mayores costos operativo de establecimiento y cosecha de plantaciones;

Cuadro 3. Requerimientos de biomasa y costos bajo tres escenarios de adquisición de biomasa para la generación eléctrica de 2 MW a partir de gasificación.

Table 3. Biomass and cost requirements under three biomass acquisition scenarios for the 2 MW gasification electricity generation.

Requerimiento	Biomasa necesaria (ton)	Costo de biomasa (USD)		
		Escenario compra en mercado	Escenario autoabastecimiento	Escenario mixto
Diario	57,6	2 304	2 880	2 585
Semanal	403,2	16 128	20 160	18 095
Mensual*	1 747,2	69 888	87 360	78 627
Anual	20 966,4	838 656	1 048 320	943 488

además, [Erechun \(2006\)](#) destaca que el escenario mixto es óptimo, en áreas con poca disponibilidad de biomasa y con costos de transporte altos, generando la necesidad de disponer recursos propios de generación eléctrica.

Al analizar los resultados de otros estudios en conjunto con la matriz de selección (figura 1) se determinó que el mejor escenario para el proyecto es la compra de biomasa, producto a un precio bajo, de simple operación y buena disponibilidad de mercado; la segunda mejor opción fue el mixto y el que mostró menor resultado fue el de autoabastecimiento. Es importante resaltar que este tipo de resultados son funcionales para periodos de 42 a 68 meses ([Caputo et al., 2015](#)), debido a que los cambios en el costo energético, oferta de biomasa y capacidad instalada de generación eléctrica pueden generar cambios susceptibles en la matriz.

Evaluación financiera

Se determinó que, para la compra, instalación e inicio de operación de un gasificador de 2 MW es necesaria una inversión total de 5 370 000 USD (80 % procedente de un préstamo). Al analizar los escenarios de venta de energía y autoabastecimiento (cuadro 4) se determinó que el escenario de venta de energía al ICE no es viable, debido que la tarifa de compra de energía es de tan solo 0,09 USD/kWh ([ARESEP, 2016](#)), mientras el costo mínimo de producción del proyecto es de 0,125 USD/kWh, la poca rentabilidad de este sistema en dichas condiciones se debe al bajo valor de compra fijado por el regulador del estado. En otro contexto, biomazas de menor eficiencia como el bagazo de la caña de azúcar alcanzan una rentabilidad para generación eléctrica por un asunto de utilización de la capacidad instalada. Por su parte [Zhang et al. \(2016\)](#) destacaron que, en mercados con un precio fijo de compra energética para la reventa, se limita el margen de ganancia a los productores, generando que muchos casos no puedan competir en el mercado ya que obtendrían pérdidas (reflejado en el proyecto con una VAN y TIR negativa).

Cuadro 4. Evaluación financiera de la factibilidad de un proyecto de generación de 2 MW de electricidad a partir de biomasa vegetal bajo dos escenarios de utilización.

Table 4. Financial evaluation of the feasibility of a project to generate 2 MW of electricity from plant biomass under two use scenarios.

Indicador financiero	Escenario	
	Venta energía la ICE	Autoabastecimiento energético
TIR (%)	-21,15	17,68
VAN (millones de USD)	-2,00	5,00
R C/B	1,07	1,82

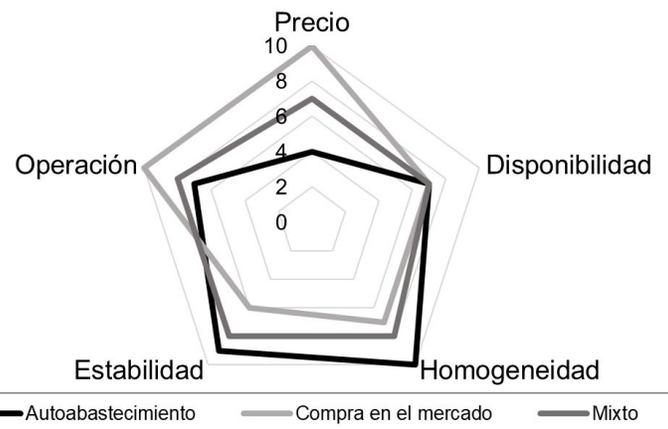


Figura 1. Matriz de evaluación de la selección de la mejor fuente de abastecimiento de biomasa para un proceso de gasificación un nivel de generación de 2 MW.

Figure 1. Evaluation matrix for the selection of the best biomass supply source for a gasification process at a production level of 2 MW.

En el escenario de autoconsumo el proyecto mostró viabilidad (cuadro 4) con una VAN y TIR positiva y una R B/C de 1,82; la viabilidad de este escenario en

comparación al anterior se debió a que el costo de generación es un 35 % inferior al costo del kilowatt que es comprado por las empresas en el mercado nacional, lo cual convierte al proyecto en una opción viable; Kim y Park (2015) determinaron que para que los proyectos sean viables de generación eléctrica en comparación al consumo de electricidad de mercado debe obtener un margen mínimo de utilidad del 5 % con respecto al valor de mercado. Zhang et al. (2016) destacaron que en este tipo de proyectos de autoabastecimiento eléctrico aumentan la competitividad de las empresas al reducir los costos de producción.

Al analizar la viabilidad del proyecto en los dos escenarios con variaciones del mercado (cuadro 5), se encontró que el escenario de venta de energía al ICE no es viable independientemente al aumento del costo de la biomasa, de la eficiencia del proceso de gasificación, a los cambios en la demanda eléctrica nacional o al aumento de precio de venta de electricidad; esto debido a la falta de un esquema de tarifas propio para la biomasa, siendo que actualmente la tarifa sea ajustada a los precios de generación de las nuevas plantas hidroeléctricas que van desde de 0,09 a 0,12 USD/kWh. En cambio, con el escenario de autoabastecimiento, un aumento en el precio de la tarifa eléctrica o un incremento en la eficiencia de generación eléctrica, aumentaría la competitividad del proyecto.

Conclusiones

Ante las tendencias actuales de demanda eléctrica a nivel nacional en conjunto a los elevados precios de combustibles fósiles para generar energía térmica, el desarrollo de proyectos para la generación de electricidad de 2 MW a partir de biomasa es potencialmente viable si se implementa un gasificador con una eficiencia del 75 %, abastecido de biomasa adquirida en el mercado nacional (con un precio de referencia de 40 USD/ ton de

biomasa seca) y con la finalidad de autoabastecimiento. Los escenarios de venta de energía al ICE actualmente no son viables debido a los precios de compra que fija el ente regulador (ARESEP), siendo significativamente menor a los costos de generación por gasificación obtenido en el estudio de 0,125 USD/kWh.

Existe en el país un marco metodológico para que cualquier empresa solicite tarifas personalizadas para la generación con biomasa, por lo que se recomienda generar la información completa sobre los costos de este tipo de actividad. En el presente estudio se brindó un marco de referencia.

Agradecimientos

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Tecnológico de Costa Rica, al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) por todo el apoyo logístico, técnico y financiero brindado durante la ejecución del presente estudio que formó parte del proyecto “Impulso tecnológico para la producción, transformación y uso de la biomasa para energía y biomateriales a partir de los residuos lignocelulósicos” (Contrato FI084-13).

Referencias

- Balderrama, S., Luján, C., Lewis, D., Ortega, J., de Jong, B., y Nájera, T. (2011). Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México. *Madera y bosques*, 17(2), 67-84.
- Bilgili, M., Koçak, E., Bulut, U., Kuykaya, S. (2017). Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable

Cuadro 5. Análisis financiero de dos escenarios de utilización de los 2 MW de electricidad generada a partir de biomasa vegetal con cambios en los escenarios del mercado.

Table 5. Financial analysis of two use scenarios of the 2 MW of electricity generated from plant biomass with changes in market scenarios.

Variable modificada	Viabilidad del escenario	
	Venta energía al ICE	Autoabastecimiento energético
Aumento del 30 % precio biomasa	No viable	Viable
Aumento del 20 % en la generación del kilowatt hora	No viable	No viable
Aumento del 10 % del costo del kilowatt hora en el mercado nacional	No Viable	Viable
Disminución del 25 % de generación eléctrica del gasificador	No viable	No viable

- development?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 2017: 830-845.
- Cardona, E., Rios, L., Peña, J., Peñuela, M., Rios, L. (2016). King Grass: A very promising material for the production of second generation ethanol in tropical countries. *Biomass and Bioenergy*, 95: 206-213
- Caputo, A. C., Palumbo, M., Pelagagge, P. M., & Scacchia, F. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: Effects of logistic variables. *Biomass and Bioenergy*, 28(1), 35-51.
- Del Val Gento, V., y Antolín, A. (2009). Planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual. Escuela técnica Superior de Ingenieros Industriales. Valladolid. Recuperado de http://www.eis.uva.es/energias-renovables/trabajos_07/Cogeneracion-Biomasa.pdf
- Erenchun, P. (2006). Evaluación técnico-económica de una central termoeléctrica utilizando combustible en base a biomasa. Recuperado de http://dspace.usal.es/bitstream/1950/5764/1/erenchun_podlech.pdf
- Estrada, C. A., y Meneses, A. Z. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et Technica*, 2(25).
- Kim, K., Park, K. (2016). Financial development and deployment of renewable energy technologies, *Energy Economics*, 59: 238-250
- Ma, J., Xiao, X., Bu, R., Doughty, R., Hu, Y., Chen, B., Li, Y., Zhao, B. (2017). Application of the space-for-time substitution method in validating long-term biomass predictions of a forest landscape model. *Environmental Modelling & Software*, 94: 127-139.
- Melgar, A., Perez, J. F., Laget, H., y Horillo, A. (2007). Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 59-67.
- Pérez, J., Borge, D., y Agudelo, J. (2010). Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales *Biomass gasification process: theoretical and experimental studies a review*. scielo. org. co, 95-107.
- Pérez, A., y García, E. (2013). *Energía alterna y biocombustibles: innovación e investigación para un desarrollo sustentable*. (1a ed.). Montecillo, Texcoco: Editorial del Colegio de Postgraduados.
- Pérez, J., y Osorio, L. (Eds.). (2014). *Biomasa forestal como alternativa energética: Análisis silvicultural, técnico y financiero de proyectos* (1 ed.). Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.
- Peters, R., Klesse, S., Fonti, P., Frank, D. (2017). Contribution of climate vs. larch budmoth outbreaks in regulating biomass accumulation in high-elevation forests. *Forest Ecology and Management*, 401: 147-158.
- Salazar, E. (2016). Influencia de altas densidades de plantación en el poder calorífico y propiedades físicas de la madera para la especie *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(30), 51-56.
- Suzuki, K., Tsuji, N., Shirai, Y., Hassan, M., Osaki, M. (2017). Evaluation of biomass energy potential towards achieving sustainability in biomass energy utilization in Sabah, Malaysia. *Biomass and Bioenergy*, 97:
- Tanaka, N., Levia, D., Igarashi, Y., Yoshifuji, N., Tanaka, K., Tantasirin, C., Nanko, K., Suzuki, M., Kumagai, T. (2017). What factors are most influential in governing stemflow production from plantation-grown teak trees?. *Journal of Hydrology*, 544: 10-20.
- Wang, H., Yan, J., Dong, L. (2006). Simulation and economic evaluation of biomass gasification with sets for heating, cooling and power production. *Renewable Energy*, 99: 360-368.
- Zhao, X., Liu, W., Deng, Y., Zhu, J. (2017). Low-temperature microbial and direct conversion of lignocellulosic biomass to electricity: Advances and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 71: 268-282

Este artículo debe citarse como:

González, G; Arias, D; Valvede, JC; Camacho, D; Roldán, C. (2018). Evaluación financiera de generación eléctrica de 2 MW a partir de biomasa forestal en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15 (Suppl. 01): 37-44. doi. 10.18845/rfmk.v15i1.3709