

METODOLOGÍA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO CON BIOMASA FORESTAL EN EL DEPARTAMENTO DE NARIÑO: CASO DE ESTUDIO

Andrés Darío Pantoja-Bucheli¹, Juan Carlos Guerrero-Ordóñez²,
Jhon Fredy Castillo-Muñoz³

¹ Doctorado en Ingeniería. Profesor de tiempo completo e investigador principal, Proyecto Alternar.
Correo electrónico: ad_pantoja@udenar.edu.co

² Magíster en Ciencia de la Ingeniería de Energía. Investigador, Proyecto Alternar

³ Ingeniero electrónico. Joven investigador
Departamento de Electrónica, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia

Recibido: 18 de enero del 2016 Aprobado: 15 de mayo del 2016

Cómo citar este artículo: C. Guerrero-Ordóñez, A. D. Pantoja-Bucheli, J. F. Castillo-Muñoz, "Metodología para el aprovechamiento del potencial energético con biomasa forestal en el departamento de Nariño: caso de estudio", *Ingeniería Solidaria*, vol. 12, no. 20, pp. 43-59, oct. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v19i20.1415>

Resumen. *Introducción:* el presente artículo es producto de investigación del proyecto "Análisis de oportunidades energéticas con fuentes alternativas en el departamento de Nariño –Alternar–", ejecutado desde el 2014 hasta inicios del 2016, por la Universidad de Nariño, en cooperación con la Universidad de los Andes y ASC Ingeniería s. A. E. s. P., con el apoyo de la Gobernación de Nariño, y financiado por el Sistema General de Regalías durante el 2014, en Colombia. El objetivo de la investigación fue proponer un esquema de aprovechamiento integral y sostenible de los recursos locales para la generación de energía, investigando las tecnologías de redes inteligentes y microrredes aplicadas a zonas no interconectadas ZNI. *Metodología:* los estudios se llevaron a cabo en dos poblaciones de la región Pacífica nariñense, donde los índices de cobertura energética son muy bajos (2-5 horas/día). Para determinar el potencial energético de cada ZNI, se realizaron los siguientes pasos: caracterización geográfica y socioeconómica de la localidad, caracterización de la demanda energética, caracterización de los residuos forestales, diseño de la planta de gasificación y del sistema híbrido y el prediseño de la red eléctrica. *Resultados:* en las dos ZNI de estudio, se describen los equipos del sistema híbrido mediante simulaciones de optimización en Homer. *Conclusiones:* es factible usar residuos forestales para la energización de las ZNI con tecnologías sostenibles, para minimizar así la dependencia de combustibles fósiles y reducir la producción de los gases de efecto invernadero.

Palabras clave: costa Pacífica nariñense, gasificación, microrred, residuo forestal, zonas no interconectadas.



METHODOLOGY FOR THE BETTER USE OF ENERGY POTENTIAL WITH FORESTRY BIOMASS IN THE DEPARTMENT OF NARIÑO, COLOMBIA: STUDY CASE

Abstract. *Introduction:* This article is the result of the research project “Analysis of energy opportunities with alternative sources in the Department of Nariño —Alternar”, conducted from the year 2014 to early 2016, by the Universidad de Nariño, in cooperation with the Universidad de los Andes and ASC Ingeniería S. A. E. S. P., and the support of the Nariño Governorate Office. The project was financed by the General System of Royalties during the year 2014 in Colombia. The objective of the research is to propose a structure for an inclusive and sustainable leveraging of local resources for the generation of energy, by investigating Intelligent Networks technology and micro-grids applied to un-interconnected zones (ZNI). *Methodology:* The studies were conducted in two populations of the Pacific region of Nariño, where the coverage index of the energy grid is very low (2-5 hours/day). The following steps were performed to determine the energy potential of every ZNI: geographic and socioeconomic characterization of the location, characterization of energy demand, characterization of forestry waste, design of the gasification and hybrid system installations, and predesign of the electric grid. *Results:* In the two ZNI of the study, the hybrid system equipment is described using simulations of optimization in Homer. *Discussion:* It is feasible to use forestry waste for the energization of ZNI with sustainable energy in order to minimize dependence of fossil fuels and thus reducing the production of greenhouse gases.

Keywords: Pacific Coast of Nariño, gasification, micro-grid, forestry waste, un-interconnected zones.

METODOLOGIA PARA O APROVEITAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO COM BIOMASSA FLORESTAL NO DEPARTAMENTO DE NARIÑO, COLÔMBIA: ESTUDO DE CASO

Resumo. *Introdução:* este artigo é produto da investigação do projeto “Análise de oportunidades energéticas com fontes alternativas no departamento de Nariño –Alternar–”, executado desde o ano 2014 até começos do ano 2016, pela Universidad de Nariño, em cooperação com a Universidad de los Andes e ASC Ingeniería S. A. E. S. P., e o apoio da Governação de Nariño, e financiado pelo Sistema Geral de Regalias durante o ano 2014, na Colômbia. O escopo da investigação foi propor um plano de aproveitamento integral e sustentável dos recursos locais para a geração de energia, investigando as tecnologias de redes inteligentes e micro-redes aplicadas a zonas não interligadas ZNI. *Metodologia:* os estudos foram executados em duas zonas da região pacífica de Nariño, onde os índices de suprimento energético são muito baixos (2-5 horas/dia). Para determinar o potencial energético de cada ZNI, realizaram-se os seguintes processos: caracterização geográfica e socioeconômica da localidade, caracterização da demanda energética, caracterização dos resíduos florestais, projeção da usina de gasificação e do sistema híbrido e o pré-projeto da rede elétrica. *Resultados:* nas duas ZNI em estudo, descrevem-se os equipamentos do sistema híbrido através de simulações de aprimoramento em Homer. *Conclusões:* é possível usar resíduos florestais para a energização das ZNI com tecnologias sustentáveis, para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e reduzir também a produção dos gases de efeito estufa.

Palavras chave: costa Pacífica de Nariño, gasificação, micro-rede, resíduo florestal, zonas não interligadas.



1. Introducción

Actualmente, las tecnologías convencionales más usadas en el mundo para generar energía son alimentadas con petróleo o carbón como fuentes primarias, lo que produce enormes cantidades de CO_2 , entre otros gases que provocan el efecto invernadero y el calentamiento global. La reducción de estos gases es el fundamento para incentivar y desarrollar proyectos con fuentes alternativas de energía en países que cuenten con potencial como alta radiación solar, velocidad de viento o residuos biomásicos.

Paul Crutzen, premio Nobel de Química del 2000, explicó en el 2004 la transición a una nueva etapa geológica llamada *Antropoceno*¹, en la cual todas las decisiones y acciones realizadas por el ser humano producen efectos e impactos a todo el ecosistema del planeta. Un ejemplo son los disturbios ecológicos ocasionados por la liberación de los gases de efecto invernadero (CO_2 y metano) a la atmósfera, hecho que provoca el calentamiento global [1]. Uno de los impactos verificables de esta época es la extinción de especies en el ecosistema, como algunas clases de tortugas que fueron señaladas en vía de extinción debido al aumento de la temperatura en 2°C en el 2015 [2].

A pesar de esto, la energía es un recurso transversal para el desarrollo de la humanidad, cuya demanda continúa creciendo no solo en el sector industrial de países desarrollados, sino también en la demanda residencial y comercial de todas las edificaciones, que representan alrededor de un 70 % de toda la electricidad producida [3]. En este sentido, mundialmente la investigación en tecnologías eficientes para obtener energía eléctrica crece rápidamente, lo que reduce costos en la implementación de sistemas solares y eólicos [4]. Además, los estudios se han encaminado al desarrollo de tecnologías termoquímicas, que permiten convertir la energía del sol contenida en la biomasa (fotosíntesis) y obtener productos combustibles, que con tecnologías eficientes permiten la producción de energía eléctrica [5].

En Suramérica, Uruguay se destaca por los avances en proyectos de aprovechamiento de recursos, como la planta de cogeneración instalada en Rivera, donde la energía producida es usada para

el secado de madera y la generación de electricidad que abastece sus propias instalaciones. Esta planta produce energía a partir de la combustión de aserrín de los aserraderos de la región [6].

En Chile, la empresa Celulosa Arauco y Constitución S. A., dedicada a la producción de pulpa de celulosa y derivados de madera aserrada, desarrolló el proyecto Trupán Biomass Power Plant [7], el cual utiliza los residuos del proceso para la generación de electricidad a través de calderas de cogeneración; esto produce alrededor de 30 MW para su auto abastecimiento y para la inyección a la red eléctrica interconectada.

La planta de biomasa de Sangüesa ubicada en Navarra, España, es una referencia internacional sobre las posibilidades de aprovechamiento de la biomasa para la generación de electricidad [8]. Su capacidad es de potencia instalada: 30 MW y produce 200 GWh de energía anual, equivalentes al consumo de más de 60.000 hogares, a partir de la combustión de 160.000 toneladas de paja de cereal, lo que evita la emisión a la atmósfera de unas 192.000 toneladas de CO_2 .

En Colombia, la investigación y el desarrollo en tecnologías de generación de energía a partir de biomasa para zonas no interconectadas (ZNI) se encuentran en proceso de diseño y los proyectos que involucran la construcción y operación de estas tecnologías son reducidos. De acuerdo con los reportes bibliográficos, se destacan dos casos: la planta de gasificación con residuos de madera ubicada en Necolí, Antioquía [9], y la planta piloto de gasificación con residuos vegetales en el Jardín Botánico de Bogotá.

Con estos proyectos se soporta la factibilidad de diseñar sistemas aislados basados en el uso eficiente de los residuos forestales en zonas no interconectadas que cuentan con fuentes cercanas de residuos forestales como aserraderos. Un diseño apropiado basado en redes inteligentes [10] es capaz de suplir eficientemente las necesidades energéticas en estas localidades, que dado su aislamiento geográfico, presentan problemas de agua potable, bajos índices educativos y poco desarrollo social; además han sido durante mucho tiempo zonas de riesgo del conflicto sociopolítico colombiano [11].

Particularmente en Nariño, la mayoría de las poblaciones en las zonas rurales de las ZNI cuentan con escasas 3 o 5 horas de servicio en promedio, situación generalizada en los municipios cercanos a la costa Pacífica y persistente aún en veredas alejadas

1 De *Anthrōpos* ('hombre') y *kainos* ('nuevo, reciente') [1].

de las cabeceras municipales de la región andina. Según los resultados del Plan de Energización Rural Sostenible para el Departamento de Nariño (PERS), para el 2014 existen alrededor de 7450 viviendas sin servicio, mientras que unos 28 000 usuarios obtienen el recurso de plantas diésel municipales, propias o compartidas [12].

Con el ánimo de caracterizar el potencial energético no convencional, el proyecto “Análisis de Oportunidades Energéticas con Fuentes Alternativas en el Departamento de Nariño – Alternar”, realizado por la Universidad de Nariño en cooperación con la Universidad de los Andes, ASC Ingeniería S.A. E.S.P., y con el apoyo de la Gobernación del Departamento de Nariño, tiene como objetivo proponer un esquema de aprovechamiento integral y sostenible de los recursos locales para la generación de energía alternativa mediante la investigación en tecnologías de redes inteligentes y microrredes aplicadas a zonas rurales, abordando los retos del cambio climático, el uso racional de la energía y la solución de las necesidades socioeconómicas propias de cada región [13].

En el presente artículo se describen los avances realizados en Alternar en dos localidades de ZNI de la costa Pacífica nariñense para generación de energía eléctrica a partir de residuos forestales característicos de estas zonas. El principal objetivo de este estudio es la propuesta de una metodología basada en la recolección de información primaria y secundaria. La metodología se explica mediante un diagrama de flujo y en los resultados se describe su aplicación en las dos zonas de estudio. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas a través de esta experiencia.

2. Metodología

Con base en la revisión de artículos científicos, en la experiencia obtenida en trabajos anteriores por la Universidad de Nariño [4, 14] y en salidas de campo, se propone la siguiente metodología para el diseño inicial de un sistema de generación de energía a partir de residuos forestales en zonas no interconectadas. Un diagrama de flujo de la metodología se muestra en la figura 1.

- Caracterización de la zona de estudio: el estudio de la zona se realiza en cuatro aspectos principales: social, cultural, económico y geográfico,

teniendo en cuenta características como las actividades económicas, principales cultivos, consumo de energía, cantidad de escuelas y hospitales, entre otras. Con estos datos se identifica la población y se estima la posible demanda para cuantificar el potencial energético con biomasa forestal y los impactos a la población. Los mecanismos para desarrollar este proceso son entrevistas, encuestas, fotografías y documentos que presenten información secundaria de las zonas de estudio.

- Caracterización de la demanda energética: la caracterización de la demanda energética es un proceso muy importante, ya que se estima la capacidad de generación que tendrá la planta de estudio. Las ZNI en Colombia por lo general se abastecen de plantas diésel que suministran energía entre 2 y 6 horas por día, de tal forma que la proyección de una planta para las 24 horas requiere la aplicación de métodos estadísticos y matemáticos rigurosos que necesitan la información primaria recolectada en campo en el proceso anterior.
- Caracterización de la biomasa: las principales características de la biomasa que se deben analizar son las cantidades de residuos disponibles, sus propiedades físico-geométricas, definición de tamaño, composición química elemental e inmediata y propiedades energéticas: poder calorífico y fundición de cenizas [5]. Estas propiedades se obtienen con tomas de muestras en campo para realización de análisis hechos en laboratorios especializados, siguiendo normas de la *American Society for Testing and Materials* ASTM.
- Diseño de la planta de generación de energía con residuos forestales: la conversión de la energía contenida en los residuos a energía útil (productos combustibles, calor o electricidad) se realiza por procesos termoquímicos o bioquímicos y existen varias tecnologías en cada caso, como se puede ver en la figura 2. En este proceso es importante realizar una base de datos con los principales indicadores energéticos, económicos y ambientales para cada tecnología, conseguidos a través de artículos especializados aplicados en poblaciones con similitudes en el número de usuarios y en los aspectos social, económico y cultural. Para el análisis económico de la planta se requiere información primaria sobre costos de transporte, combustible, salarios por persona, operación y mantenimiento por aserradero,

consumo energético de la planta diésel y costos de la implementación de la nueva red, si es necesario. En este proceso también se analizan los posibles trayectos y tipos de transporte de carga necesarios para llevar la biomasa a la zona de estudio. En la figura 2 se muestra un esquema de los tipos de biomasa y los procesos de conversión a productos combustibles.

- Diseño preliminar de la red eléctrica, incluido el generador a partir de biomasa en la zona de

estudio: en este proceso se determinan lugares donde geográficamente sea posible la construcción de la planta y se reduzcan los costos y pérdidas en la red. También se describe la infraestructura eléctrica necesaria para la instalación de las plantas y el mecanismo preliminar de control de la microrred para un sistema híbrido de generación de energía de forma óptima para minimizar los costos de generación y cubrir la demanda de las poblaciones estudiadas.

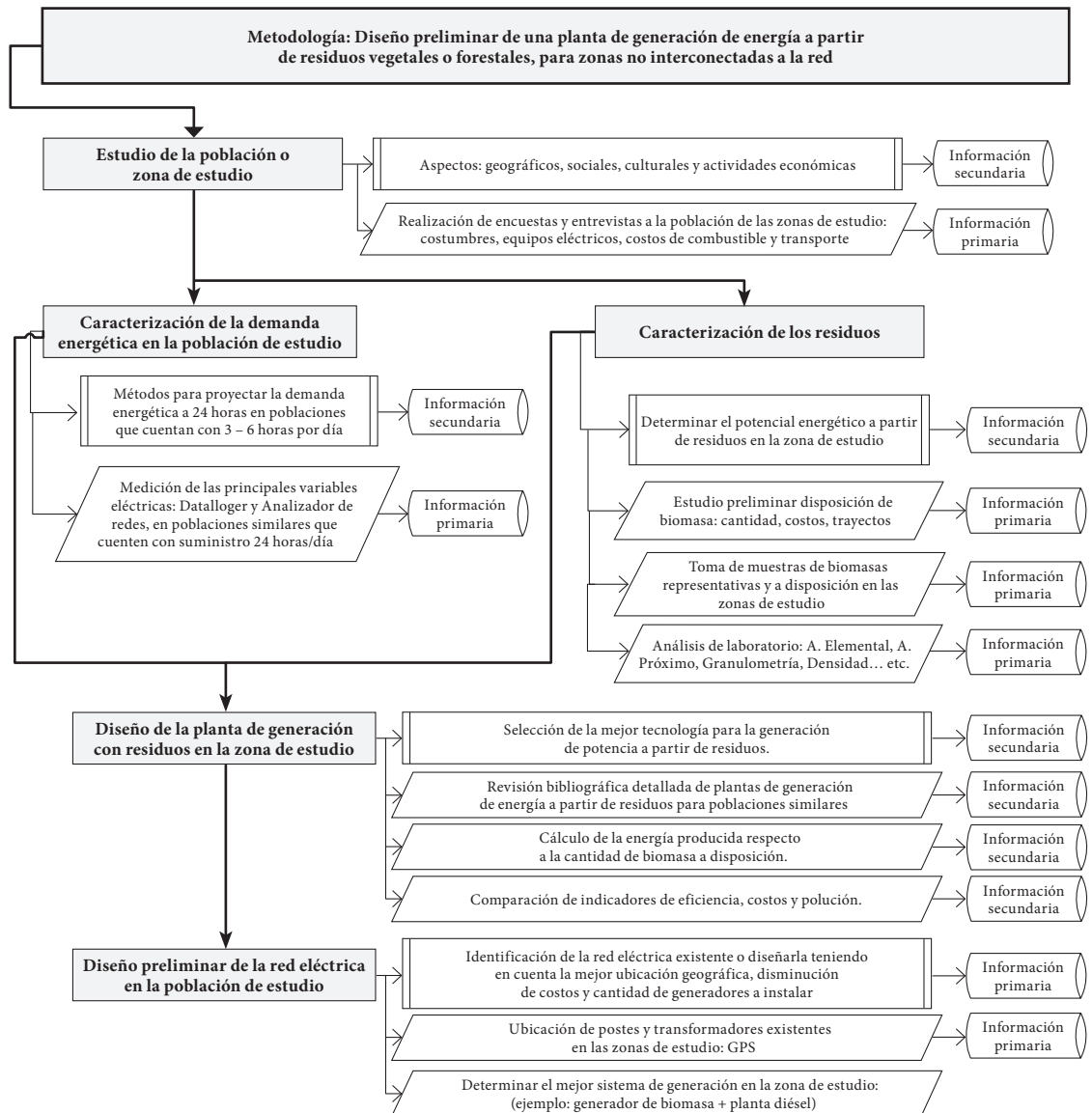


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología: diseño preliminar de una planta de generación de energía a partir de biomasa en ZNI

Fuente: elaboración propia

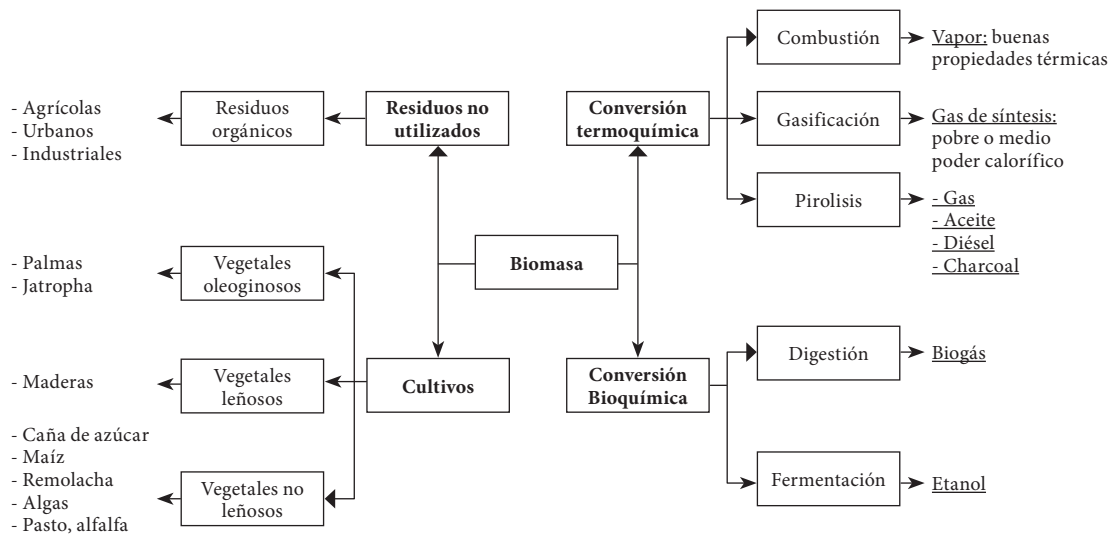


Figura 2. Esquema de los tipos de biomasa y los procesos de conversión de la biomasa a productos combustibles
Fuente: adaptado de [5]

3. Resultados

3.1 Caso de estudio

En esta sección se describe la aplicación de la metodología mostrada en la sección anterior a dos zonas de estudio: Cocal Payanes, del municipio de Mosquera y el sector de Bocagrande, del municipio de Tumaco, poblaciones que pertenecen a la costa Pacífica nariñense (ver figura 3). Estas veredas fueron seleccionadas para dimensionar una solución energética a partir de biomasa forestal, por ser la fuente de mayor abundancia en la región, producto de la intensa actividad maderera [15].

3.2 Aspecto socio-económico de las zonas de estudio

La Gobernación de Nariño divide el departamento estratégicamente en trece subregiones, relacionando los aspectos social, económico, geográfico y cultural, y estableciendo semejanzas entre las localidades. La costa Pacífica está compuesta por tres subregiones: Sanquianga, Pacífico Sur y Telembí, como se puede ver en la figura 3 [16].

La economía de las subregiones de la costa se basa en el sector agrícola, donde se destaca la producción de plátano, palma africana, coco, cacao, banano, arroz, caña de azúcar, maíz y frutas tropicales. También existe una notoria actividad minera,



Figura 3. Superior: localización del departamento de Nariño en Colombia. Inferior: distribución del departamento de Nariño en subregiones
Fuente: [16]

explotación de ganado bovino y especies menores; además, se destacan especialmente las actividades de dendroenergía [17]. Particularmente, la zona de estudio tiene una población aproximada de 450 habitantes en Cocal Payanes (subregión Sanquianga) y de 200 habitantes en Bocagrande (subregión Pacífico Sur).

En la tabla 1 se resumen algunos indicadores de los aspectos social, económico, ambiental y agrícola para cada subregión de las cuales hacen parte las zonas de estudio. Como se observa, en Sanquianga se encuentra la mayor cantidad de población en ZNI, con un porcentaje elevado de viviendas sin servicio de electricidad. Este porcentaje es bajo en el Pacífico Sur, dado que la mayoría de habitantes de este sector se encuentra en Tumaco, cabecera municipal principal de la región y segunda ciudad de Nariño. Sin embargo, muchas veredas del sector rural tienen energía solamente suministrada por plantas diésel pocas horas al día. Por otra parte, la demanda energética es baja por habitante, en comparación con las viviendas urbanas, y las hectáreas de leña consumidas representan un indicador alto de la cantidad de posibles residuos forestales por ser utilizados.

En la figura 4 se muestran los volúmenes de terrenos autorizados para la explotación forestal en los municipios del departamento según la Corporación Autónoma Regional de Nariño (Corponariño). Es destacable que en los municipios escogidos como casos de estudio se presenta la mayor actividad maderera y sus productos son comercializados generalmente a través de los puertos de Buenaventura y Tumaco.

Las actividades dendroenergéticas en estas zonas son realizadas en aserríos o aserraderos conformados por diferentes etapas, entre las que destacan el sistema de recepción de la biomasa, las bandas transportadoras, los sistemas de corte longitudinal (descortezadora), de corte transversal (sierras), una fuente de potencia (alimentada por motores diésel) y un lugar de recolección de los productos finales (figura 5). En el aserrío prototipo escogido para el estudio trabajan aproximadamente veinte personas alrededor de tres semanas al mes. Algunos datos económicos del aserrío se muestran en la tabla 2, y se destaca allí el alto consumo y la elevada inversión para la adquisición de combustible, que debe ser transportado en lancha desde las cabeceras municipales o desde Buenaventura.

Tabla 1. Indicadores energéticos en las subregiones donde se ubican las zonas de estudio

| Subregión | % viviendas sin electricidad | Energía per cápita/día [MCal] | Hectáreas de leña consumidas | Cultivos sobresalientes |
|--------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Sanquianga | 30,9 | 9,94 | 489,88 | Coco, cacao, caña |
| Pacífico Sur | 7,5 | 3,97 | 120,73 | Palma africana |

Fuente: [16]

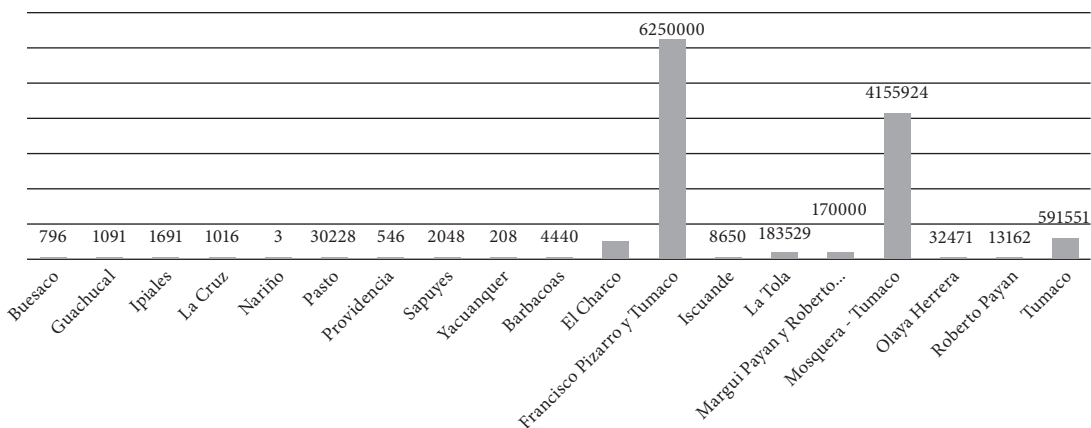


Figura 4. Volumen autorizado por Corponariño para comercialización de madera

Fuente: elaboración propia



a. Sistema de recepción de madera



b. Sistema corte longitudinal



c. Sistema de sierras



d. Sistema alimentación de energía

Figura 5. Procesos de transformación de la madera en un aserrío típico de la costa del departamento de Nariño. Caso de estudio: aserrío Las Palmas, Cocal Jiménez

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Flujo económico del aserrío Las Palmas, ubicado en Cocal Jiménez, costa del departamento de Nariño: pesos colombianos en el 2014

| ASERRÍO LAS PALMAS, COCAL JIMÉNEZ | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------|---------|---------------|---------|--------------------------|--------------|------------------|
| Consumo de energía (1 motor) | | | | Combustible | | Mantenimiento | Trabajadores | |
| Potencia hp | Consumo comb. gal/hora | \$ comb./ mes | \$ lata | horas/ mes | gal/mes | \$ mantenimiento/ año | Número | \$sueldo/ mes |
| 120 | 2 | 5760 000 | 40 000 | 120 | 240 | 8 000 000 | 27* | 7 560 000 |

* En total son 20 trabajadores de los cuales 7 trabajan a doble turno, lo que duplica el salario al mes

Fuente: elaboración propia

3.3 Caracterización de la biomasa

Se recolectaron once muestras (ver tabla 3) en las dos zonas de estudio para analizar sus propiedades biológicas, físico-químicas y energéticas, cuyos valores coinciden aproximadamente con un estudio previo realizado en el municipio de Olaya Herrera, también en la subregión de Sanquianga. En esta zona cercana se obtuvieron densidades aparentes del aserrín entre 70 y 120 kg/m³ densidades reales entre 570 y 970 kg/m³, y para los trozos de madera una densidad aparente entre 120 y 160 kg/m³, y densidades reales entre 450 y 700 kg/m³ [14].

Las once muestras recolectadas en este trabajo fueron analizadas en el laboratorio especializado en combustibles y combustión de la Universidad del Valle y los resultados son mostrados en la tabla 4. Estos análisis han sido comparados con estudios del aprovechamiento de biomasa peletizada para la generación de energía [18], en los cuales destaca la relación entre la humedad con el poder calorífico y la necesidad de un sistema de pretratamiento de secado de acuerdo con la tecnología de transformación energética utilizada.

Tabla 3. Descripción de las once muestras recolectadas en las zonas de estudio

| Número muestra | Tipo de biomasa | Nombre aserrío |
|----------------|-------------------|------------------------------|
| 1 | Aserrín | Gaby - Tumaco |
| 2 | Retazos | Nilo Goyes - Tumaco |
| 3 | Retazos | Las Palmas - Cocal Jiménez |
| 4 | Aserrín | Las Palmas - Cocal Jiménez |
| 5 | Viruta | El Pital |
| 6 | Tronco | El Pital |
| 7 | Coco | Cultivo de cocos en Mosquera |
| 8 | Palos de la playa | Playa el Rompido |
| 9 | Aserrín | Santander - Tumaco |
| 10 | Viruta | Santander - Tumaco |
| 11 | Retazos | Gaby - Tumaco |

Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Resultados de los análisis realizados a las once muestras de las zonas de estudio: Mosquera y Tumaco

| Análisis | | Promedio residuos de madera Tumaco | | Promedio residuos de madera Mosquera | | Palos en la playa Boca Grande | | Cascaras de coco Mosquera | |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------|--------------------------------------|---------|-------------------------------|---------|---------------------------|---------|
| | | | Seco | | Seco | | Seco | | Seco |
| Análisis próximo | Humedad total (% en peso) | 29,1 | | 40,4 | | 25,2 | | 28,1 | |
| | Materia volátil (% en peso) | 59,3 | 83,7 | 48,8 | 82,2 | 58,8 | 78,6 | 51,8 | 72,1 |
| | Cenizas (% en peso) | 1,5 | 2,2 | 2,0 | 3,3 | 6,5 | 8,7 | 4,4 | 6,1 |
| | Carbón fijo (% en peso) | 10,1 | 14,1 | 8,8 | 14,5 | 9,5 | 12,7 | 5,7 | 21,9 |
| | Poder calorífico superior (kcal/kg) | 3196,5 | 4515,1 | 2627,9 | 4422,5 | 3088,9 | 4130,6 | 3241,8 | 4510,6 |
| | Poder calorífico superior (BTU/lb) | 5754,0 | 8127,2 | 4730,5 | 7960,3 | 5560,0 | 7435,0 | 5835,0 | 8119,0 |
| | Azufre (% en peso) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,1 |
| Análisis elemental | Humedad total (% en peso) | 29,1 | | 40,4 | | 25,2 | | 28,1 | |
| | Cenizas (% en peso) | 1,5 | 2,2 | 2,0 | 3,3 | 6,5 | 8,7 | 4,4 | 6,1 |
| | Carbono (% en peso) | 35,7 | 50,4 | 30,4 | 51,1 | 36,7 | 49,1 | 37,2 | 51,7 |
| | Hidrogeno (% en peso) | 4,3 | 6,1 | 3,8 | 6,3 | 4,3 | 5,8 | 4,0 | 5,5 |
| | Nitrógeno (% en peso) | 0,8 | 1,1 | 0,5 | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 0,7 | 1,0 |
| | Azufre (% en peso) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,1 |
| | Oxígeno (% en peso) | 28,6 | 40,2 | 22,9 | 38,4 | 26,2 | 35,0 | 25,6 | 35,7 |
| PCS kJ/Kg | | 13383,0 | 18903,0 | 11002,0 | 18516,0 | 12932,0 | 17294,0 | 13572,0 | 18884,0 |
| PCI kJ/Kg | | 11723,0 | 16536,0 | 9176,0 | 14575,0 | 11360,0 | 15191,0 | 12011,0 | 16714,0 |

Fuente: elaboración propia

Para el caso de Cocal Payanes, se visitaron dos aserríos por disponibilidad y cercanía, mientras que para el caso del sector de Bocagrande se pudo contar con los numerosos aserraderos que operan cerca de la cabecera municipal de Tumaco. En la tabla 5 se muestra la estimación de la cantidad de residuos para cada zona de estudio.

Tabla 5. Producción de residuos de maderas para las dos zonas de estudio: Cocal Payanes (Mosquera) y Sector de Bocagrande (Tumaco)

| Producción de residuos en las zonas de estudio | | | |
|--|---------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Nombre del aserradero | Ubicación | Consumo de madera (troza x día) | Producción residuos (ton x día) |
| LAS PALMAS | Cocal Jiménez | or50 | 1,4 |
| CHAMUSERO | El Pital | 64 | 1,7 |
| 10 aserríos | Tumaco | 600 | 13 (promedio) |

Fuente: elaboración propia

En este caso, se determinó una producción aproximada de 1,5 a 2 toneladas diarias de residuos forestales. Más adelante se enseña un cálculo de lo que podrían generar en potencia, y si es suficiente para abastecer a las comunidades cercanas en donde la interconexión eléctrica no es viable.

Los resultados obtenidos a través de la recolección de muestras sirven para calcular la cantidad de energía eléctrica generada por el sistema de gasificación.

3.4 Caracterización de la demanda de energía en las ZNI

En el trabajo realizado por la Universidad de Nariño [19], se muestran en detalle los métodos aplicados para caracterizar la demanda energética en las zonas de estudio. Para uno de los métodos aplicados, fue necesario medir el consumo de energía en poblaciones cercanas y similares, las cuales presentan servicio de electricidad las 24 horas al día y tienen condiciones parecidas en los aspectos social, económico, cultural y geográfico; de este modo, se puede cubrir ampliamente el comportamiento de la demanda energética para las zonas escogidas.

La cabecera municipal de Mosquera cuenta con estos requerimientos para estimar la demanda de energía en el caso de Cocal Payanes, y la vereda de Bajito Vaquería —del municipio de Tumaco— permite proyectar la demanda energética en el sector de Bocagrande. Adicionalmente, se realizaron encuestas a los usuarios de estas localidades para conocer la similitud social y cultural, información que puede ser consultada en Velásquez y Fajardo [20]. La demanda energética que fue medida con analizadores de red y *dataloggers* en la Cabecera de Mosquera y en Bajito Vaquería se muestra en la figura 6.

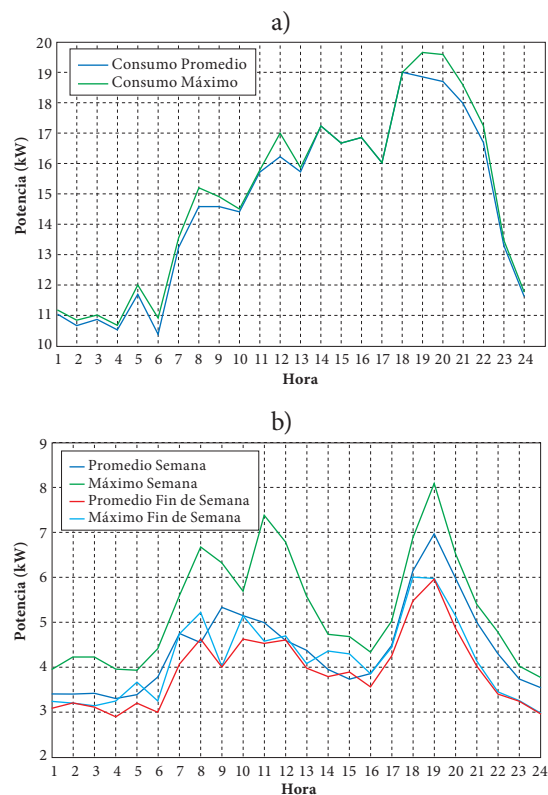


Figura 6. Medición de la demanda energética en la a) cabecera municipal de Mosquera y en b) Bajito Vaquería, Nariño

Fuente: elaboración propia

En la cabecera municipal de Mosquera se midió durante un periodo de cuatro días en un transformador de 47 kW que provee energía a 35 usuarios. Los datos fueron procesados de modo que se obtuviera el promedio de consumo por hora y el máximo consumo. Como resultado, el cálculo de la potencia consumida por día es de 352,58 kW y 10,07 kW

por usuario. Para la vereda de Bajito Vaquería, Tumaco, se evidenciaron picos de demanda en horas de la mañana, al medio día y en la noche. La potencia promedio por día en la semana es de 106,05 kW y en el fin de semana, de 94,17 kW.

Con este comportamiento y usando los métodos matemáticos y estadísticos aplicados en [19], fue posible proyectar la demanda de la población objeto de estudio en Cocal Payanes (figura 7).

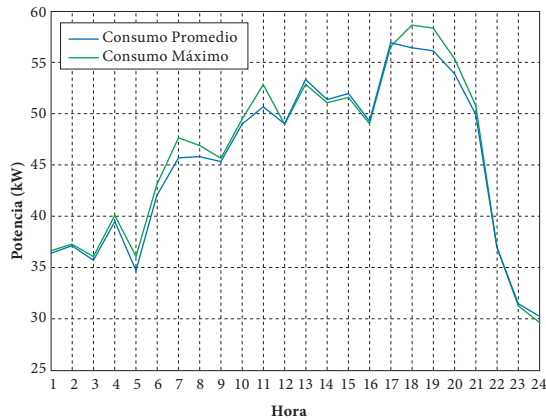


Figura 7. Estimación del consumo energético en Cocal Payanes para las 24 horas del día, Mosquera
Fuente: elaboración propia

Para determinar la curva de demanda a partir de un caso particular de estudio, es necesario encontrar el consumo promedio hora por cada usuario, además de las tasas de crecimiento de la curva base. Con estos valores y depurando datos atípicos que afectan el normal comportamiento de la curva, se pudo estimar el consumo energético para Cocal Payanes, con lo cual se obtuvo una demanda de 1087,72 kW por día para un total de 115 usuarios, tanto residenciales como comerciales. La demanda promedio por usuario es de 9,64 kW al día, con un consumo pico alrededor de los 60 kWh.

Con la información obtenida en la zona modelo, se proyectó también la demanda para el sector de Bocagrande, con un total de 33 usuarios, determinando el consumo energético tanto para días de la semana, como para los fines de semana. Se obtuvo una demanda promedio de 147,16 kW para el primer caso y de 244,48 kW para el segundo, con una demanda pico entre los 15 y 16 kWh; similar a la demanda de Cocal Payanes (figura 8).

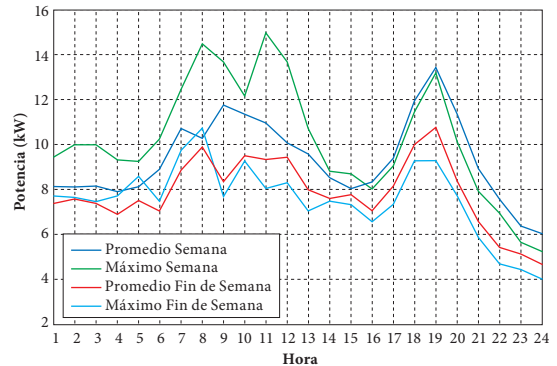


Figura 8. Estimación del consumo energético en Bocagrande, Tumaco

Fuente: elaboración propia

3.5 Generación de energía eléctrica a partir de residuos de madera

Para este estudio se analizaron modelos a partir del proceso termoquímico de la gasificación. Según algunos estudios científicos [17], esta tecnología funciona adecuadamente para generadores de capacidad menor a 5 MW, considerando que esta tecnología se instala en sistemas de generación distribuida en los cuales el consumidor final se ubica cerca al generador. Sin embargo, su operación es compleja, pero presenta costos aceptables de operación y mantenimiento, en comparación con los demandados en otras técnicas de aprovechamiento de biomasa como las calderas [5]. Además, estas pequeñas escalas de producción energética son compatibles para trabajar en grupo (soluciones híbridas) con otras formas de generación de energías renovables [10].

En la tabla 6 se muestran las eficiencias en plantas existentes de generación de energía a partir de biomasa con gasificador + MCI. Las eficiencias de las plantas de gasificación se encuentran en un rango desde el 16,6 % hasta el 25 %, comparadas con plantas con calderas tradicionales que no superan el 17 % de eficiencia de generación de energía [5].

Para el caso de Cocal Payanes, la capacidad calculada del generador es de 60 kW. Teniendo en cuenta que los dos aserríos más cercanos se encuentran aproximadamente a 15 y 20 km y que producen tres toneladas por día de residuos en promedio, se creó un modelo simple que permite calcular la eficiencia que tendría la planta (tabla 7) y estimar la disponibilidad de residuos de madera mostrada en la

tabla 8. El modelo fue adaptado a partir del balance energético mostrado en artículos y trabajos realizados con condiciones similares. Los indicadores de entrada del modelo son mostrados en la tabla 7.

Tabla 6. Eficiencia de plantas de generación de energía con gasificador + motor de combustión interna

| Eficiencia de una planta de GMCI (Gasificación - Motor de Combustión Interna) | | | | |
|---|---------------|--------------------------|---------|------------|
| Combustible | Potencia (kW) | Eficiencia eléctrica (%) | País | Referencia |
| Biomasa forestal | 150 - 1500 | 25 | Bélgica | [13] |
| Madera | 750 | 21,4 | España | [14] |
| Biomasa | 2000 | 25 | Austria | [15] |
| Madera | 12 - 16 | 21 - 24 | España | [16] |
| Astilla de madera | 15 - 20 | 25 | Turquía | [16] |
| Madera | 17,5 | 16,6 | India | [16] |

Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Cálculos de la planta de gasificación para el caso de Cocal Payanes

| Características planta de gasificación Cocal Payanes (60 kW) | | |
|--|----------|----------|
| Característica | Valor | Unidades |
| Potencia eléctrica final | 60 | kWe |
| Rendimiento del motor - generador | 0,25 | % |
| Potencia térmica requerida | 240,0 | kW |
| Eficiencia del proceso de gasificación y pretratamiento de biomasa | 0,6 | % |
| PCS (base seca) | 18516,00 | kJ/kg |
| Consumo de biomasa | 77,77 | kg/h |
| | 2,06 | ton/día |
| Eficiencia de la planta | 15 | % |

Fuente: elaboración propia

Los residuos producidos por los dos aserríos ubicados cerca a Cocal Payanes son suficientes para generar 60 kW las 24 horas, supliendo las necesidades energéticas en esta localidad. Incluso, se determinó que el 40 % de los residuos recolectados sería almacenado como reserva para momentos críticos de desabastecimiento que podría sufrir la planta.

Tabla 8. Cálculo de disponibilidad de residuos para el caso de Cocal Payanes

| Disponibilidad de residuos en Cocal Payanes | | |
|--|-----|---------|
| Demanda de residuos por el gasificador | 6 | ton/día |
| Estimado de producción residuos de madera por aserrío | 1,5 | ton/día |
| Número de aserríos | 2 | |
| Factor de seguridad de residuos: cantidad de residuos producida por los dos aserríos/cantidad requerida por el gasificador | 1,4 | |

Fuente: elaboración propia

En el caso del sector de Bocagrande, la capacidad que debe tener el generador es de 20 kW, con una disponibilidad de residuos alrededor de 13 ton/día, producto de más de diez aserríos que operan en la cabecera municipal (la distancia entre Bocagrande y Tumaco es 15 km aproximadamente). En la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos por el modelo y las características de la planta de gasificación, y se estiman así los residuos requeridos para satisfacer la demanda. En las tablas 9 y 10 se presentan los resultados para dos escenarios de estudio. En el primero, se estiman los residuos necesarios para la demanda; mientras que en el segundo, se estima la energía eléctrica generada usando la totalidad de residuos producidos por diez aserríos de Tumaco. El promedio de producción de residuos por aserrío es de 1,3 ton/día para esta zona.

Para producir 20 kW durante 24 horas, se requiere procesar 0,84 ton/día de residuos de madera, por lo que se necesitaría un solo aserrío y se asumiría una eficiencia de la planta de 12 %.

La planta de gasificación, usando la producción de residuos en diez aserríos, podría generar 400 kW, suficiente para más de 400 usuarios. En la tabla 11 se muestra la disponibilidad total de los residuos.

Con el estudio realizado se determina claramente que el potencial energético de los residuos calculado para estas dos zonas de estudio es alto; en ambos casos los residuos producidos son suficientes para abastecer a las localidades de estudio. En Cocal Payanes, es posible proveer la demanda energética a partir de la producción de residuos de madera de solo dos aserríos, siendo la mayor dificultad el transporte de los residuos a la planta. Para el caso del sector de Bocagrande, basta con los residuos producidos en un aserrío para suplir las necesidades de la población. Cabe destacar que debido a la

gran cantidad de residuos generados, existe un alto potencial para abastecer de energía a otras ZNI alejadas a los centros de procesamiento de madera.

Para las dos ZNI, el sistema de generación considerado como más apropiado incluye un gasificador a partir de residuos forestales, debido a la gran disponibilidad de recursos. Sin embargo, también se tiene en cuenta un sistema híbrido con un gasificador como generador principal y uno diésel como respaldo, ya que actualmente las ZNI tienen plantas diésel operando entre tres y seis horas al día. De este modo, se evaluaron tres escenarios que son descritos en la tabla 12, teniendo como referencia las descripciones de operación de las plantas existentes [4, 5, 10, 11].

Tabla 9. Escenario 1: capacidad de generación de energía eléctrica con una planta de gasificación, para el sector de Bocagrande del municipio de Tumaco

| Características planta de gasificación sector Bocagrande (20 kW) | | |
|--|----------|----------|
| Característica | Valor | Unidades |
| Potencia eléctrica final | 20 | kWe |
| Rendimiento del motor-generador | 0,2 | % |
| Potencia térmica requerida | 100,0 | kW |
| Eficiencia del proceso de gasificación y pretratamiento de biomasa | 0,6 | % |
| PCS (base seca) | 18903,00 | kJ/kg |
| Consumo de biomasa | 31,74 | kg/h |
| | 0,84 | ton/día |
| Eficiencia de la planta | 12 | % |

Fuente: elaboración propia

Tabla 10. Escenario 2: capacidad de generación de energía con gasificación usando la totalidad de residuos producidos en Tumaco

| Características planta de gasificación residuos producidos en Tumaco | | |
|--|----------|----------|
| Característica | Valor | Unidades |
| Potencia eléctrica final | 400 | kWe |
| Rendimiento del motor-generador | 0,3 | % |
| Potencia térmica requerida | 1333,3 | kW |
| Eficiencia del proceso de gasificación y pretratamiento de biomasa | 0,7 | % |
| PCS (base seca) | 18903,00 | kJ/kg |
| Consumo de biomasa | 362,75 | kg/h |
| | 9,60 | ton/día |
| Eficiencia de la planta | 21 | % |

Fuente: elaboración propia

Tabla 11. Cálculo de disponibilidad de residuos para el caso de Bocagrande

| Factor de seguridad de biomasa para Tumaco | | |
|--|------|---------|
| Demanda de residuos por el gasificador | 9,6 | ton/día |
| Estimado de producción residuos de madera por aserrío | 1,3 | ton/día |
| Número de aserríos | 10 | |
| Factor de seguridad de residuos: cantidad de residuos producida por los dos aserríos/cantidad requerida por el gasificador | 1,35 | |

Fuente: elaboración propia

Tabla 12. Escenarios de evaluación para la planta de generación de energía en las zonas de estudio

| | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 |
|--|---|--|---|
| Descripción de la planta de generación de energía | El gasificador funcionaría como generador primario y la planta diésel de respaldo | La planta diésel seguiría su funcionamiento habitual por un tiempo de tres a seis horas diarias y el gasificador entraría a operar en las horas de mayor demanda | Solo funcionaría el gasificador debido a la alta disposición de materia prima |
| Emisiones de agentes contaminantes y uso de combustibles fósiles | Medio | Medio | Muy bajo |
| Aprovechamiento de los recursos forestales | Medio | Bajo | Alto |

Continúa en página 56

Viene de página 55

| | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 |
|--|-------------|-------------|---------------|
| Costos de inversión | Alto | Medio-alto | Alto-muy alto |
| Costos debido al mantenimiento y operación | Medio | Alto | Medio |
| Costos del combustible líquido | Medio | Alto | Nulo |
| Complejidad del sistema | Alto | Alto | Alto |

Fuente: elaboración propia

3.6 Evaluación económica y diseño de la planta de energización para las ZNI

La evaluación económica y el diseño de la planta de energización se realizaron con el programa Homer, el cual usa modelos de optimización para seleccionar la configuración de las tecnologías que tengan menor costo de generación en un tiempo de vida respecto a la demanda energética en cada ZNI. En este caso se ingresaron costos de gasificadores de 20-40 y 60 kW de capacidad y motores diésel de 20-40 y 60 kW de generación. También se incluyeron costos de operación y mantenimiento.

Los valores de entrada de cada simulación usada por el programa Homer son variables económicas y técnicas de cada planta, obtenidas de catálogos, cotizaciones y valores mostrados en estudios similares. Para las plantas diésel se consideraron costos de catálogo para diferentes capacidades de generación. Para la planta de gasificación, los valores económicos se tomaron de estudios similares realizados en Colombia [9].

Los resultados muestran que, para Cocal Payanes, el sistema híbrido estaría conformado por una planta diésel de 40 kW y un gasificador de 60 kW (figura 9); para el caso de Bocagrande se seleccionó un sistema híbrido compuesto por una planta diésel de 10 kW y un gasificador de 20 kW (figura 10).

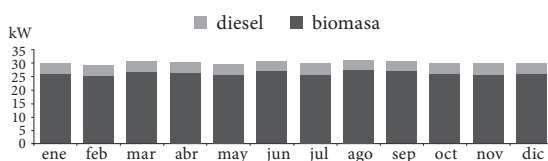


Figura 9. Comportamiento de la disposición del gasificador y planta diésel para Cocal Payanes

Fuente: elaboración propia

El gasificador se encargaría de generar el 67%; mientras que la planta diésel, el 33% de la demanda de energía de la localidad. El escenario de menor costo por kWh generado es de 960 \$COP/kWh.

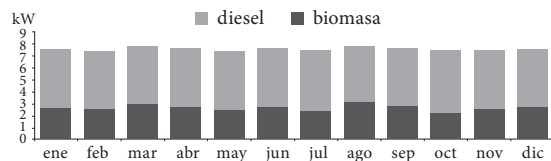


Figura 10. Comportamiento de la disposición del gasificador y planta diésel para Bocagrande

Fuente: elaboración propia

Para este caso el gasificador y la planta diésel operan simultáneamente en horas pico; sin embargo, el gasificador operaría en un 35% de la producción total, considerando al gasificador como un sistema de respaldo. El menor costo por kWh generado se calculó cuando se tenía una planta diésel nueva de 10 kW y un gasificador de 20 kW 1008 \$COP/kWh.

3.7 Diseño preliminar de la red eléctrica

Después de estimar el consumo energético, la caracterización del recurso biomásico y el levantamiento de la red eléctrica actual para los dos casos, es posible realizar un bosquejo de la nueva microred eléctrica para las zonas de estudio.

El sistema de generación en los escenarios de estudio llevaría sistemas de aislamiento que pueden ser provistos por transformadores y protecciones que realicen una desconexión en caso de algún problema en la red, como un cortocircuito. Para el sistema híbrido sería necesario implementar sistemas de sincronización y control, como el mostrado en la figura 11.

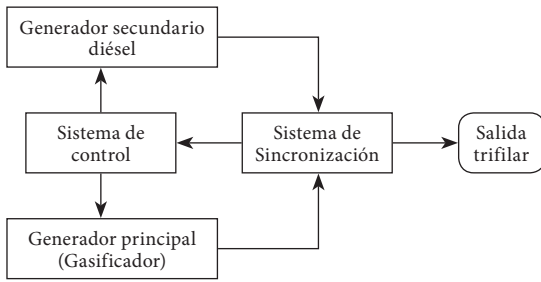


Figura 11. Esquema de un sistema de generación híbrido controlado y sincronizado
Fuente: elaboración propia

La optimización de un sistema híbrido de generación eléctrica se llevaría a cabo por medio de un sistema de control, cuya función principal es combinar la generación de los dos sistemas, con el propósito de minimizar el uso del combustible fósil y obtener el máximo provecho de la biomasa residual. El sistema de sincronización permite que las formas de onda, tanto de voltaje como de corriente, tengan un adecuado comportamiento, y de esta manera se evitan posibles sobrecargas del sistema y otros inconvenientes. Se ha considerado que el abastecimiento a los usuarios finales debe ser en modo trifásico, con dos fases a 220 V y otra neutra, en las cuales la combinación de estas permitirá la instalación del servicio a tensiones de 110 y 220 V, respetivamente.

En la figura 12 se muestra el diseño de la microred para las ZNI de estudio. Los puntos representan los postes localizados con GPS, y miden las distancias entre cada poste que cubre a cada localidad; adicionalmente, se muestran la ubicación de los generadores diésel que actualmente operan y el lugar donde serían ubicados los gasificadores.

La estructura actual de la red cuenta con postes en madera y metal con sus respectivas normas técnicas como puestas a tierra, mientras que el cableado es realizado a baja tensión en cable tetrafililar.

El sistema de control prevé que cada usuario final contará con un contador o medidor energético con capacidad de transmisión de datos a un registrador central. Con esto se tendrá una medida en tiempo real de la demanda de cada usuario y se pueden implementar programas de gestión de la demanda y proveer un mejor aprovechamiento de los recursos.

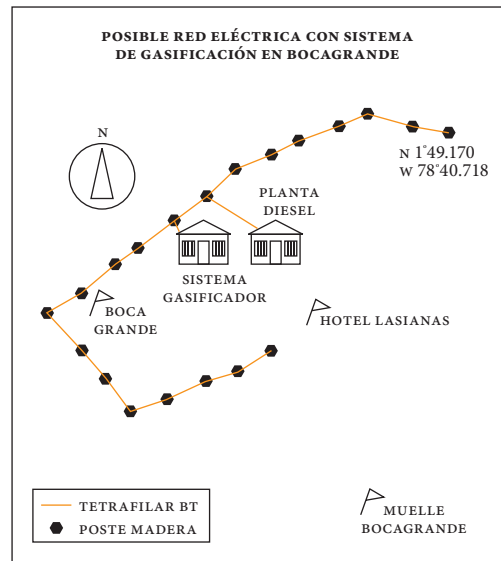
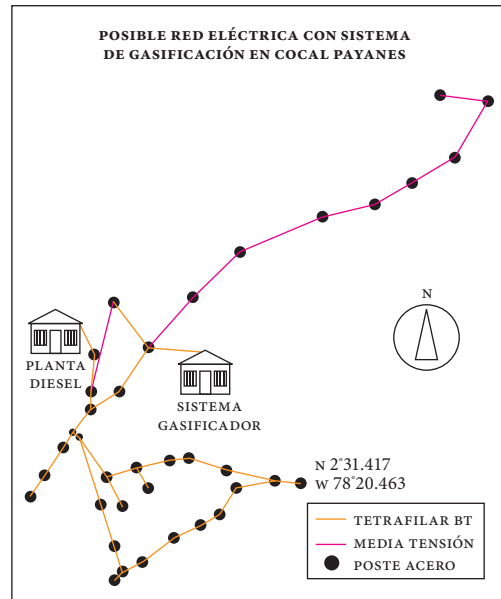


Figura 12. Posibles redes eléctricas para Cocal Payanes y Bocagrande, teniendo como generador principal un gasificador
Fuente: elaboración propia

4. Conclusiones

En este trabajo se muestra el potencial energético generado a partir de residuos forestales, respecto a la demanda de energía estimada en los dos casos de estudio en ZNI. Cabe destacar la gran cantidad de residuos forestales que actualmente se están

desperdiciando y que están produciendo impactos ambientales negativos por su quema o disposición final a los ríos. En este sentido, la implementación de generación de energía con fuentes alternativas permite reducir la dependencia de una planta diésel como generador principal, lo que disminuye drásticamente los costos y la emisión de gases de efecto invernadero, entre otros beneficios sociales en las poblaciones de estudio.

Para el caso de Cocal Payanes el costo de energía generada es menor que para Bocagrande, debido a que el sistema seleccionado en Cocal Payanes presenta mayor participación del gasificador y de esta manera reduce el costo del diésel para 20 años, mientras que el sistema en Bocagrande usa como generador primario el diésel principalmente para disminuir costos de inversión del gasificador, respecto al reducido número de usuarios en estas ZNI.

Por otro lado, las salidas de campo a las zonas de estudio permitieron entender el gran interés y motivación de las comunidades afectadas por las deficiencias en el suministro de energía. Los problemas sociales requieren estudios continuados y la inclusión de la comunidad como agentes activos en los proyectos de generación de energía con fuentes alternativas en poblaciones no interconectadas.

Los cálculos de la producción de energía a partir de los residuos de madera se realizaron teniendo como referencia valores de producción de residuos estimados por las experiencias de los trabajadores de cada aserrío. Sin embargo, se deben desarrollar metodologías más precisas para determinar la cantidad de residuos producidos respecto al tipo de madera y sus propiedades físico-biológicas.

Referencias

- [1] P. J. Crutzen, "New directions: the growing urban heat and pollution "island" effect—impact on chemistry and climate", *Atmospheric environment*, vol. 38, no. 21, pp. 3539-3540, 2004. Disponible en: <http://www2.iq.usp.br/docente/perola/Aulas/crutzen.pdf>.
- [2] Oceanic Preservation Society y Vulcan Productions Inc. "Racing Extinction", *Discovery Chanel*, Estados Unidos, video documental, 2015 [en línea]. Disponible en: <http://racingextinction.com/the-film/>.
- [3] N. Gershenfeld, S. Samouhos y B. Nordman, "Intelligent Infrastructure for Energy Efficiency", *Science*, vol. 327, no. 5969, pp. 1086-1088, 2010 [en línea]. Disponible en: <http://science.sciencemag.org/content/327/5969/1086.short>
- [4] D. Schnitzer, D. S. Lounbury, J. P. Carvallo, R. Deshmukh y D. Kammen, *Microgrids for Rural Electrification: A critical review of best practices based on seven case studies* USA: United Nations Foundation, 2014, p. 120. [en línea]. Disponible en: <https://rael.berkeley.edu/publication/microgrids-for-rural-electrification-a-critical-review-of-best-practices-based-on-seven-case-studies/>
- [5] J. M. Martínez, y E. E. Lora, *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. Bogotá, Colombia: La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía 2014, p. 330.
- [6] Fenirosol, S. A. "Proyecto de generación de energía a partir de subproductos de madera", 2007 [en línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/019/as413s/as413s.pdf>
- [7] Celulosa Arauco y Constitución S.A., "Trupán Biomass Power Plant", *Informe interno: Proyecto CDM*, octubre 2004 [en línea]. Disponible en: <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1138289069.87/view?cp=1>
- [8] A. Erviti, "EHN: Planta de Biomasa de Sangüesa 25 MW de potencia neta mediante combustión de paja", documento informativo, 12, diciembre 2002 [en línea]. Disponible en: <http://www.istas.net/portada/bio05s.pdf>
- [9] Unidad de Planeación Minero Energético [UPME], *Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia*. Bogotá, Colombia: Aene Consultoría S.A., julio 2013, p. 142. [en línea]. Disponible en http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/potencialidades/biomasa_CULTIVOS%20ENERGETICOS.pdf
- [10] N. Hatziaargyriou, "Microgrids, the Key to Unlock Distributed Energy Resources?", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 26-29, 2008 [en línea]. Disponible en: <http://www.science.smith.edu/~jcardell/Courses/EGR325/microGrid%20Readings/uGridIssueOvw.pdf>
- [11] J. Giraldo, y C. Álvarez, "La Generación distribuida como alternativa energética en zonas no interconectadas de Colombia", *Revista CIDET*, vol. 11, pp. 9-20, 2014 [en línea]. Disponible en: https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKewiUoNTUtnQAhXD4iYKHaeGAW0QFggBMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.umariana.edu.co%2Ffojs-editorial%2Findex.php%2Flibroseditorialunimar%2Farticle%2Fview%2F705%2F630&usq=AFQjCNE32m8aX4XI-17GUqMbXoDIVTKsQnA&sig2=9V2gCCJSbjS-f5ezCzUFA_A

- [12] Plan de Energización Rural Sostenible [PERS-Nariño], “Diagnóstico energético y social de las zonas rurales del departamento de Nariño”, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia, Informe Técnico, 2014. Disponible en: <http://sipersn.udenar.edu.co:90/sipersn/>
- [13] Universidad de Nariño, “Proyecto: análisis de oportunidades energéticas con fuentes alternativas en el departamento de Nariño – Alternar”, San Juan de Pasto, Colombia, 2015 [en línea]. Disponible en: alternar.udenar.edu.co
- [14] Plan de Energización Rural Sostenible [PERS-Nariño], “Análisis de generación de energía eléctrica a partir de residuos forestales en el municipio de Olaya Herrera del departamento de Nariño”, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia, Informe Técnico, 2014 [en línea]. Disponible en: <http://sipersn.udenar.edu.co:90/sipersn/>
- [15] Administración Municipal de Mosquera, “Plan de Desarrollo Municipal 2012 - 2015: Gobierno siempre en marcha: Mosquera ciudad de oportunidades”, Alcaldía de Mosquera, Colombia, Plan de Desarrollo 2012 [en línea]. Disponible en: http://mosquera-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/30356337633365346538323761613866/informe-avance-plan-de-desarrollo-2014-y-cuatrenio_1.pdf
- [16] Gobernación de Nariño, “Plan de Desarrollo Departamental: ‘Nariño Mejor’ 2010-2014”, San Juan de Pasto, Colombia, Plan de Desarrollo, 2010 [en línea]. Disponible en: http://www.viceinvestigacion.unal.edu.co/VRI/files/docs/Regalias/PD_Nari%C3%B1o.pdf
- [17] Alcaldía Municipal de Tumaco, “Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Tumaco 2008-2019”, Alcaldía de Tumaco, Colombia, 2008 [en línea]. Disponible en: http://www.tumaco-narino.gov.co/apc-aa-files/61616166346535623838616166343139/POT_2008_2019.pdf
- [18] Federación Española de Industrias de la Madera (FEIM), “Generación energía eléctrica distribuida, con biomasa industrial”, Artículo informativo, Madrid, España, 2014 [en línea]. Disponible en: <http://www.faien.es/wp-content/uploads/2016/07/Presentaciones-2%C2%AA-mesa.pdf>
- [19] L. Chávez, V. Fajardo y B. Velásquez, “Demanda de energía eléctrica en las localidades de Cocal Payanes y Bocagrande”. Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia, Informe Interno, 2015.
- [20] B. Velásquez y V. Fajardo, “Diagnóstico energético y social para las ZNI de la subregión de Sanquianga y el municipio de Tumaco”, Proyecto Alternar, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia, Informe Interno, 2015.

