

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE QUÍMICA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Estudio de prefactibilidad de la transformación de residuos orgánicos municipales en
energía”**

Maybi Patricia Rojas Soto

CARTAGO, setiembre, 2017

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental

“Estudio de prefactibilidad de la transformación de residuos orgánicos municipales en energía”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal


Ingeniero Carlos Roldán Villalobos
Director


Máster Allen Arturo Puento Urbina
Lector 1

Máster Esteban Bermúdez Forn
Lector 2


Máster Diana Zambrano Piamba
Coordinadora COTRAFIG


Doctora Floria Roa Gutiérrez
Directora Escuela de Química

Ana Lorena Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

Les dedico este logro a mis padres por siempre apoyarme y creer en mí, a mi tía Ana, a Alejandro y a mis amigos más cercanos que me motivaron en cada momento difícil de este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Primero, le agradezco a Dios por el don de la vida y la sabiduría con la que me guió en este proceso.

A mi madre, mis tías, mi abuela y mis hermanas por sus oraciones constantes a Dios para que yo pudiera terminar con éxito este proyecto.

Al profesor Carlos Roldan, por ser el tutor de mi proyecto.

Al profesor Allen Puente, por guiarme y apoyarme en el desarrollo de la investigación.

Al profesor Macario Pino, por sus consejos en el área de gestión integral de residuos.

A los compañeros del equipo de recolección de residuos de la Municipalidad de Escazú, por ayudarme durante los muestreos y las visitas.

A Róger Moya y Carlos Olivares por todo el apoyo brindado en la realización de las pruebas en el Laboratorio de Anatomía de la Madera de la Escuela de Ingeniería Forestal.

A Adrián Flores por la ayuda y orientación que me brindó en las pruebas realizadas en el CEQIATEC.

A Alejandro por ayudarme durante las visitas y muestreos en la municipalidad.

A los expertos, Cindy Torres, Alexander Davis y Bjørn Utgård por su colaboración en las entrevistas realizadas.

A Esteban Bermúdez y demás compañeros del Centro para la Sostenibilidad Urbana, por su apoyo en el proceso.

A la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica por la licencia para el uso del programa computacional ASPEN HYSYS.

A Bryan por facilitarme el uso de su computadora para utilizar el programa computacional ASPEN HYSYS.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----------|
| 1. introducción | 1 |
| 1.1. <i>Objetivos</i> | 3 |
| 1.1.1. Objetivo general..... | 3 |
| 1.1.2. Objetivos específicos..... | 3 |
| 2. Revisión de literatura | 5 |
| 2.1. <i>Antecedentes</i> | 5 |
| 2.1.1. Manejo de residuos sólidos en Costa Rica. | 5 |
| 2.1.2. Plantas de aprovechamiento de residuos orgánicos en Costa Rica..... | 6 |
| 2.1.3. Legislación | 7 |
| Reglamento sobre el manejo de residuos sólidos ordinarios N° 369093-S (2010)..... | 7 |
| Reglamento Municipal para la Gestión Integral de Residuos Sólidos en el cantón de Escazú (2015) . | 8 |
| Ley 7200 Generación Eléctrica Autónoma o Paralela (2001)..... | 8 |
| 2.2. <i>Residuos orgánicos municipales</i> | 9 |
| 2.2.1. Propiedades de los residuos orgánicos de jardinería | 11 |
| 2.2.2. Residuos de Jardinería de la Municipalidad de Escazú. | 13 |
| 2.3. <i>Tecnologías de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos</i> | 17 |
| 2.3.1. Transformaciones termoquímicas | 20 |
| Gasificación | 20 |
| Etapas de la gasificación..... | 21 |
| Tecnologías para la gasificación | 23 |

| | |
|---|-----------|
| Tipos de gasificadores | 24 |
| Gasificadores de flujo entrante..... | 24 |
| Gasificadores de lecho móvil | 25 |
| Gasificadores de lecho fluidizado..... | 27 |
| 2.3.2. Plantas de gasificación | 29 |
| Plantas de gasificación en Costa Rica..... | 29 |
| 2.4. Costos de generación de energía de la biomasa..... | 30 |
| 3. Materiales y métodos..... | 31 |
| 3.1. Lugar de estudio..... | 31 |
| 3.2. Diseños de experimentos | 32 |
| 3.2.1. Determinación de características de residuos de jardinería de la Municipalidad de Escazú. 32 | |
| Contenido de Humedad | 32 |
| Poder Calórico..... | 32 |
| Contenido de materia volátil..... | 33 |
| 3.2.2. Modelado del proceso de gasificación..... | 34 |
| Planteamiento del modelo..... | 34 |
| 3.3. Análisis económico..... | 36 |
| 4. Resultados y discusión | 37 |
| 4.1. Gestión de los residuos de jardinería de la municipalidad de Escazú..... | 37 |
| 4.2. Caracterización de los residuos de jardinería | 38 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.3. | <i>Sistema de gasificación de residuos orgánicos de jardinería.....</i> | <i>41</i> |
| 4.3.1. | Selección de la tecnología de aprovechamiento | 41 |
| 4.3.2. | Pretratamiento de la biomasa | 41 |
| 4.3.3. | Equipo gasificador | 42 |
| 4.3.4. | Selección del agente gasificante | 44 |
| 4.3.5. | Determinación de la relación de equivalencia..... | 44 |
| 4.3.6. | Diseño del sistema de gasificación mediante la simulación del proceso en un programa computacional. | 45 |
| 4.4. | <i>Evaluación económica del proyecto.....</i> | <i>53</i> |
| 5. | conclusiones y recomendaciones..... | 57 |
| 5.1. | <i>Conclusiones</i> | <i>57</i> |
| 5.2. | <i>Recomendaciones</i> | <i>58</i> |
| 6. | Referencias | 59 |
| 7. | apéndices..... | 64 |
| 8. | anexos | 74 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Energías renovables basadas en la energía primaria del sol. Adaptado de García (2013) | 10 |
| Figura 2.2 Ilustración del proceso de recolección de residuos de jardinería del cantón de Escazú..... | 14 |
| Figura 2.3 Composición de los residuos sólidos residenciales de la Municipalidad de Escazú. Adaptado de B y S Consultores S.A. (2013) | 15 |
| Figura 2.4 Composición de los residuos sólidos comerciales del cantón de Escazú. Adaptado de B y S Consultores S.A (2013)..... | 15 |
| Figura 2.5. Tecnologías de conversión de residuos orgánicos en energía. Tomado de (Pham et al., (2015))..... | 18 |
| Figura 2.6 Etapas del proceso de gasificación. Adaptado de (ALL POWER LABS, 2017). | 21 |
| Figura 2.7 Tecnologías de gasificación. Adaptado de (Basu, 2010) | 24 |
| Figura 2.8 Tipos de gasificadores de flujo entrante: (a) Alimentado lateralmente y (b) Alimentado en la parte superior. Adaptado de Basu (2010)..... | 25 |
| Figura 2.9. Esquema representativo de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante. Adaptado de (Basu, 2010). | 27 |
| Figura 2.10 Gasificador de lecho fluidizado recirculante Adaptado de Basu (2010)..... | 29 |
| Figura 3.1 Ubicación de la Municipalidad de Escazú dentro del cantón. | 31 |
| Figura 3.2 Esquema representativo del sistema de gasificación propuesto..... | 35 |
| Figura 4.1 Ilustración de la cantidad de bolsas de residuos de jardinería dispuestos por una sola vivienda. | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.2 Muestras de los residuos de jardinería del cantón de Escazú..... | 40 |
| Figura 4.3 Trituradora de residuos orgánicos. Tomado de (GERMAN-TEC, 2017)..... | 42 |
| Figura 4.4 Configuración básica del gasificador PP20. Tomado de (All Power Labs, 2017) | 43 |
| Figura 4.5 Esquema representativo del sistema de gasificación en ASPEN HYSYS..... | 46 |
| Figura 4.6 Balance de masas de la unidad de gasificación..... | 49 |

LISTA DE CUADROS (Inserte la lista de Cuadros o actualice esta lista una vez finalizado su trabajo)

| | |
|--|----|
| Cuadro 2.1 . Análisis próximo de residuos de poda. Tomado de (Huerta, 2012). | 12 |
| Cuadro 2.2 Análisis elemental de residuos de poda. Tomado de (Huerta, 2012). | 12 |
| Cuadro 2.3. Histórico mensual de recolección de residuos de jardinería de la Municipalidad de Escazú para un período de 5 años. Tomado de (Municipalidad de Escazú, 2017)... | 16 |
| Cuadro 2.4. Criterios de comparación de cuatro tecnologías de aprovechamiento de residuos orgánicos..... | 19 |
| Cuadro 2.5 Reacciones químicas del proceso de gasificación. Tomado de Basu (2010).... | 23 |
| Cuadro 2.6 Características de los diferentes gasificadores de lecho móvil. Adaptado de (Basu, 2010; Molino, Chianese & Musmarra, 2016)..... | 26 |
| Cuadro 4.1. Contenido de humedad de los residuos de jardinería de la Municipalidad de Escazú a través de muestreos en cada ruta de recolección. | 38 |
| Cuadro 4.2. Poder calórico bruto de los residuos de jardinería del cantón de Escazú determinado a las muestras representativas de cada ruta de recolección. | 39 |
| Cuadro 4.3. Medición de masas de las muestras para determinación de material volátil. ... | 39 |
| Cuadro 4.4 Composición elemental de la biomasa de alimentación al sistema. Adaptado de (Huerta, 2012)..... | 47 |
| Cuadro 4.5 Parámetros alimentados a la simulación para la corrida de gasificación..... | 48 |
| Cuadro 4.6 Reacciones de combustión del syngas. Adaptado de Basu (2010)..... | 49 |
| Cuadro 4.6 Desgloce de la inversión inicial del proyecto. | 53 |
| Cuadro 4.8 Indicadores económicos..... | 55 |

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

| | |
|--------|---|
| EVAL | Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina. |
| GIRS | Gestión Integral de Residuos Sólidos. |
| ppc | Producción Per Cápita. |
| PRESOL | Plan de Residuos Sólidos de Costa Rica. |
| CGR | Contraloría General de la República. |
| PTA | Parque de Tecnología Ambiental. |
| ICE | Instituto Costarricense de Electricidad. |
| CNFL | Compañía Nacional de Fuerza y Luz. |
| SNE | Servicio Nacional de Electricidad. |
| EPA | Environmental Protection Agency. |
| CEPAL | Comisión Económica para América Latina. |
| LHV | Lower Heating Value. |
| HHV | Higher Heating Value. |
| CYMA | Programa de Competitividad y Medio Ambiente. |
| ByS | Blanco y Sánchez. |

| | |
|-----------------|---|
| UCR | Universidad de Costa Rica. |
| TEC | Tecnológico de Costa Rica. |
| INEC | Instituto Nacional de Estadística y Censos. |
| ICAFE | Instituto Costarricense del Café. |
| COOPEDOTA | Cooperativa de Caficultores de DOTA. |
| ASTM | American Society for Testing and Materials. |
| GEI | Gases de Efecto Invernadero. |
| CH ₄ | Metano. |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono. |
| C | Carbono. |
| N ₂ | Nitrógeno. |
| S | Azufre. |
| SO _x | Óxidos de Azufre. |
| kg | kilogramo. |
| H/C | Relación Hidrógeno- Carbono. |
| kWh | Kilovatio-Hora. |
| m/s | Metros entre Segundos. |

| | |
|-----------------|---|
| kJ | Kilojulio. |
| °C | Grados Celsius. |
| bar | Unidad de Presión. |
| NO _x | Óxidos de Nitrógeno. |
| Syngas | Gas de Síntesis Producto de la Gasificación. |
| CEQIATEC | Centro de Investigaciones Químicas y Microbiológicas del TEC. |
| IMN | Instituto Meteorológico Nacional. |
| ACEPESA | Asociación Centroamericana para la Economía, la Salud y el Ambiente. |

RESUMEN

La generación energética a partir de fuentes de energía renovables es una alternativa a los efectos del cambio climático provocado por el uso de combustibles fósiles. En este caso, se planteó el uso de residuos de jardinería del cantón de Escazú para la generación de electricidad a través de un proceso de gasificación, en un sistema de lecho fluidizado utilizando aire como agente gasificante. Para la estimación de la producción energética se utilizó un programa computacional de simulación de procesos químicos llamado ASPEN HYSYS considerando la caracterización de los residuos realizada, complementada con valores reportados en la literatura. Los resultados de la simulación permitieron determinar las características del gas de síntesis (syngas) y la potencia del sistema propuesto. Además, se compararon estos datos con los del gasificador de la escuela de Ingeniería Forestal del TEC y con el rendimiento teórico del equipo seleccionado. La generación eléctrica para el diseño de gasificación planteado es de 3120 kWh para un consumo de 4 toneladas de residuos de jardinería mensuales. Con base en el análisis económico para autoconsumo de la electricidad generada, se obtuvo un período de recuperación de la inversión de 5,6 años y una tasa de retorno de 8,88% para una tasa de descuento de 5,0%, por lo que se concluye que la planta de gasificación es un proyecto viable.

Palabras clave: residuos sólidos orgánicos, residuos de jardinería, biomasa residual, gasificación, generación eléctrica, viabilidad económica.

ABSTRACT

Energy generation from renewable energy sources is an alternative to the effects of climate change caused by the use of fossil fuels. In this case, the use of garden waste from the Municipality of Escazú for the generation of electricity through a gasification process was proposed, in a fluidized bed system using air as gasifying agent. For the estimation of the energy production, the chemical process simulation software ASPEN HYSYS was used, considering the characterization of the waste, complemented with values reported in literature. The results of the simulation allowed to determine the characteristics of the synthesis gas (syngas) and the power of the proposed system. In addition, these data were compared with those of the gasifier from the Forestal Engineering Department of the Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) and with the theoretical performance of the selected equipment. The gasification for the proposed design would have a production of 3120 kWh for a consumption of 4 tonnes per month of garden waste. Based on the economic analysis considering self-consumption scenario, it was obtained a 5,6-year investment recovery period and a 8.88% rate of return for a discount rate of 5.0%, meaning that the gasification plant is a viable project.

Key words: organic solid waste, garden waste, residual biomass, gasification, electricity generation, economic viability.

1. INTRODUCCIÓN

La generación global de residuos sólidos municipales ha crecido anualmente junto con la urbanización y los estándares de consumo. En 2010, 1,3 billones de toneladas métricas de residuos sólidos municipales fueron generados alrededor del mundo y se ha estimado que la generación anual habrá alcanzado 2,2 billones de toneladas para 2025 (Pavi, Kramer, Gomes, & Miranda, 2017).

Los residuos sólidos del 54,4% de los habitantes de América Latina y el Caribe se disponen en rellenos sanitarios, un aumento significativo con respecto al 22,6% registrado en 2002.(Tello et al., 2010). Por otra parte, se ha encontrado que el uso de vertederos a cielo abierto ha disminuido del 45,3% al 23,3%, lo que se cree es debido al fuerte impulso de la normativa implementada (Tello et al., 2010). Sin embargo, persiste un gran porcentaje de residuos sólidos sin un tratamiento ni disposición final adecuada.

Otra debilidad que se tiene en cuanto al manejo de residuos sólidos es la escasez de datos confiables sobre cobertura y calidad, rendimientos, infraestructura y equipamiento, inversiones y fuentes de financiamiento, lo que impide la elaboración de políticas y planes de manejo de residuos sólidos, situación que se presenta tanto a nivel local como nacional. Esta problemática se presenta en un contexto de preocupación por la sostenibilidad económica y ambiental de los servicios (Tello et al., 2010).

El tema de residuos sólidos trae consigo múltiples impactos negativos sobre la salud de las personas y medio ambiente. Además, contar con un sistema integral del manejo de residuos contribuye al desarrollo sostenible y trae consigo beneficios económicos en cuanto a incorporación de materiales de desecho como materia prima o la utilización de residuos como fuente de energía. Por otra parte, es necesario implementar adecuados sistemas de manejo de desechos con el fin de evitar la proliferación de enfermedades y la degradación del medio ambiente circundante. Según la Evaluación Regional de Residuos Sólidos en América Latina y el Caribe (EVAL) de 2010, existen agentes en los residuos sólidos causales de determinadas afecciones a la salud de las personas, ya que estos pueden propagar vectores transportadores de enfermedades como dengue, leptospirosis, distintos trastornos gastrointestinales, dificultades respiratorias e infecciones dérmicas, efectos que son amplificados cuando la población carece de servicios de saneamiento básicos.

Aunado a los efectos a la salud que genera la descomposición de los residuos sólidos, una vez dispuestos en un sitio, los efectos al ambiente corresponden a la degradación o contaminación de la atmósfera ya que la materia orgánica presente en los residuos produce una mezcla de gases de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), los cuales son gases causantes del efecto invernadero que contribuyen al cambio climático, así mismo la emisión de dioxinas y furanos producto de la quema descontrolada de residuos sólidos domiciliarios. Por otro lado, el impacto de los desechos sólidos sobre el suelo comprende la alteración de las propiedades físicas, químicas y la fertilidad del suelo por la presencia de aceites, grasas, metales pesados y ácidos (Jimenez, 2013).

Los residuos sólidos orgánicos representan una parte importante de la composición global de los residuos sólidos municipales, según la Auditoría Operativa de Recolección de Residuos Sólidos Ordinarios realizada en 2016 por la Contraloría General de la República, el 58% de los residuos nacionales son orgánicos. Esta auditoría examinó la Gestión Integral de Residuos Sólidos en los 81 cantones del país. De los cuales, solo se conoce que las municipalidades de Pérez Zeledón, Alvarado, Jiménez y Grecia tienen un sistema de aprovechamiento de los mismos (compostaje) (Contraloría General de la República, 2016).

A pesar de la situación nacional actual, se conoce el potencial energético que existe en estos residuos y la oportunidad que representan para incursionar en otros tipos de fuentes de energías renovables y así contribuir en la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles. Esto debido a que los residuos sólidos orgánicos pueden ser utilizados como insumo en diferentes procesos de generación energética, cuyo impacto en el balance de CO₂ es reducido ya que, durante el crecimiento, la biomasa fija CO₂ a través del proceso de fotosíntesis y, si se utiliza esta biomasa en procesos con fines energéticos hasta obtener CO₂ como residuo, se tiene un impacto casi nulo en la emisión de este gas de efecto invernadero (Shi, Ge, Chang, Shao, & Tang, 2013). Además, valorizar estos residuos contribuye a la eliminación de los efectos adversos de la disposición en sitios inadecuados.

La Ley 8839 para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) de Costa Rica promueve el aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales pues se pueden obtener ganancias que activen la economía de su gestión. Además, se visualiza como una fuente de ingresos para los gobiernos locales que permita tener estudios de generación y composición de desechos, así como implementar eficientemente los planes de gestión de residuos sólidos.

La Municipalidad de Escazú, en su búsqueda de implementación de la GIRS, ha incursionado en el ámbito de los residuos sólidos orgánicos, específicamente, residuos de jardinería. Desde 2010 los recolecta de forma separada, sin embargo, a la fecha representa únicamente un gasto para el municipio pues solo se disponen en el Parque de Tecnología Ambiental La Uruka, sin darles ningún tratamiento para su aprovechamiento (P. Delgado, comunicación personal, agosto 23, 2016). Los residuos de jardinería tienen naturaleza lignocelulósica (es decir, compuestos principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina) que los convierte en materiales de interés para transformaciones termoquímicas, las cuales se encuentran en tendencia en la industria de la energía renovable, pues se consideran procesos con un alto rendimiento energético.

Es aquí donde se encuentra el origen de este proyecto, considerando, la necesidad de una alternativa a estos residuos y la problemática que generan, así como la oportunidad de desarrollar un proyecto que le permita a la municipalidad tener un ahorro y poder invertir en el plan de gestión de residuos, infraestructura y otros, para su mejoramiento.

Para lograr este objetivo se selecciona la tecnología de aprovechamiento adecuada al tipo de residuos disponibles y se diseña el proceso, con los equipos requeridos para la generación eléctrica. Además, para validar el sistema se hace una valoración mediante indicadores económicos y así determinar su viabilidad.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Proponer un sistema de aprovechamiento de residuos orgánicos de jardinería recolectados por la Municipalidad de Escazú para la producción de electricidad.

1.1.2. Objetivos específicos

Caracterizar los residuos orgánicos de jardinería recolectados por la Municipalidad de Escazú.

Seleccionar un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de residuos orgánicos de jardinería.

Realizar un análisis económico del sistema de aprovechamiento propuesto para determinar su viabilidad.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

El manejo integral de los residuos sólidos en Costa Rica tiene su trayectoria, partiendo de la iniciativa de algunos proyectos y empresas privadas de elaborar planes de gestión de residuos sólidos municipales hasta que se estandarizó de manera reglamentaria mediante la publicación en 2010 de la Ley 8839 para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Sin embargo, a la fecha, existen muchas deficiencias en el manejo y disposición final de los desechos, así como carencias de información acerca de la generación y composición de los residuos a nivel municipal (Soto, 2016).

2.1.1. Manejo de residuos sólidos en Costa Rica.

Según el Undécimo Informe Estado De La Nación de 2005, el manejo de los desechos sólidos en Costa Rica no se asume aún como una responsabilidad municipal para este año y el estado aún no ha tomado un papel protagónico en el control de la cantidad y calidad de los desechos que generan los diferentes actores sociales. Se destaca un aumento en las empresas recicladoras y recuperadoras de materiales de desecho, sin embargo, éstas solo tomaban los materiales de interés y los desechos restantes los depositaban en cualquier lugar sin un manejo adecuado. Cabe resaltar que este informe hace mención a la Municipalidad de Escazú y añade que dicho gobierno local lleva al 2005, cinco años de contar con un programa de recuperación seleccionada de residuos lo cual le permite disminuir el pago por disposición final en un relleno sanitario.

Los rellenos sanitarios con una tecnología adecuada para el control de gases y lixiviados eran escasos y al 2005 se tenían una gran cantidad de vertederos sin control, algunos de ellos eran el Parque de Tecnología Ambiental de la Carpio, el Relleno Sanitario Río Azul, el Relleno Sanitario Los Mangos en Alajuela y el Relleno Sanitario Navarro en Cartago (Soto, 2005).

Según el Duodécimo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, en 2006 se generaban 4000 toneladas de residuos sólidos y alrededor de un 30% eran dispuestos sin ningún control en las calles. Para 2006, del total de los residuos sólidos recolectados por las municipalidades un 52% se dispuso en rellenos sanitarios, un 17% en vertederos semi controlados y un 22% en vertederos a cielo abierto. Por otra parte, la generación de residuos sólidos en zonas urbanas alcanzaba en 2005 valores entre 0,9- 1,1 kg/hab-día y en zonas rurales o semi urbanas alrededor de 0,8 kg/ hab-día (Soto, 2006).

Para 2007 la producción per cápita (ppc) de San José fue de 0,945 kg/hab-día lo que implica una generación total anual de 516 145 toneladas métricas para este año. Mientras que para la provincia de Limón se estimó una ppc de 0,65 kg/hab-día con una generación de 92947 toneladas métricas (Soto, 2006). Esto refleja el contraste de generación de residuos tomando en cuenta el desarrollo de un lugar o la cultura de la población.

La estimación de la ppc de residuos sólidos anual permite establecer si la tendencia es al aumento o más bien a la disminución, lo que a su vez puede reflejar la efectividad de las

medidas implementadas por los planes municipales para la gestión integral de residuos sólidos.

En el 2010, se aprueba la Ley 8839 para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos, la cual obliga a las municipalidades a contar con un plan de manejo de residuos sólidos. Además, de acuerdo a Soto (2010), en su informe sobre la Gestión de Residuos Sólidos para el Programa Estado de la Nación, las municipalidades no han implementado el plan de residuos sólidos de Costa Rica (PRESOL), para la orientación en el tema de manejo integral de residuos sólidos. Cabe destacar que esta autora señala la falta de estudios de composición de los desechos como una de las dificultades ante la elaboración de planes de gestión con acciones acertadas y que permitan dimensionar adecuadamente la construcción de centros de acopio y proponer tratamiento a los residuos generados.

Según el PRESOL (2016), se generaron 3955 toneladas diarias en 2011, cifra que aumentó a 4000 toneladas diarias durante 2014. Dichos residuos se distribuyen entre 30 vertederos sin control y seis rellenos sanitarios de los cuales tres se encuentran en cierre técnico. (Ministerio de Salud, 2016). En este mismo año la Contraloría general de la República (CGR) realizó una auditoría a la gestión integral de los residuos sólidos donde se obtuvieron resultados preocupantes, 14 municipalidades carecen del plan de gestión integral, y de los 55 planes revisados 17 no poseen objetivos claros en torno a una recolección selectiva, accesible, periódica y eficiente. Además, reportan una evidente debilidad en la gestión financiera del servicio ya que los municipios no actualizan la tasa del servicio y los modelos tarifarios no toman en cuenta todos los componentes de la gestión integral de los residuos.

Si se habla de residuos orgánicos, algunas municipalidades han mostrado iniciativas en la recolección de estos residuos y en la elaboración de compostaje a partir de los mismos. De acuerdo con lo reportado por la Auditoría de Recolección de Residuos Ordinarios realizada por la Contraloría General de la República (2016) los cantones de Jiménez y Alvarado recolectan de manera separada estos residuos y tienen una planta de compostaje. Por otra parte, la Municipalidad de Curridabat está trabajando en la iniciativa de recolectar y aprovechar los residuos orgánicos de jardinería de los parques, sin embargo, apenas se está elaborando en una propuesta de proyecto (S. Pérez, comunicación personal, febrero 2, 2017) Mientras que la Municipalidad de Escazú desde 2011 recolecta de manera separada los residuos orgánicos de jardinería en todas las comunidades del cantón, pero, no existe algún aprovechamiento de los mismos y son depositados en el parque de tecnología ambiental (PTA) Uruka.

2.1.2. Plantas de aprovechamiento de residuos orgánicos en Costa Rica

En el sector de los residuos agrícolas orgánicos se ha incursionado en la gasificación de cascarilla de arroz, compostaje de residuos de caña de azúcar y café y generación de biogas para el sector bovino y porcino (Coto, 2013).

En cuanto al sector municipal, la Estrategia Nacional de Reciclaje de 2016 establece que las municipalidades deben encargarse de la recolección y tratamiento de los residuos orgánicos. Sin embargo, a la fecha no se tiene reporte de algún gobierno local que haya implementado

el aprovechamiento energético. Se han desarrollado o planteado proyectos de pirólisis pero para el tratamiento de residuos ordinarios no orgánicos.

2.1.3. Legislación

La legislación en Costa Rica sobre el manejo de residuos sólidos incluye varios reglamentos o leyes para la implementación a través de las municipalidades, el Ministerio de Salud y en general, todos los ciudadanos. Sin embargo, en cuanto al aprovechamiento energético de residuos sólidos orgánicos no existe un reglamento en específico.

En esta sección se citan artículos específicos de la normativa nacional asociada a la gestión integral de los residuos, el aprovechamiento energético y la regulación de los residuos orgánicos en la municipalidad de Escazú.

Ley 8839 para la Gestión Integral de Residuos (2010).

Artículo 4, inciso d

Después de evitar, reducir y reutilizar se encuentra el orden de valorizar que se refiere a valorar los residuos por medio del reciclaje, el co-procesamiento, el resamblaje u otro procesamiento técnico que permita la recuperación del material y su aprovechamiento energético.

Por otra parte, también se establece el ente encargado de la gestión y manejo de los residuos sólidos a través del Reglamento sobre el Manejo de Residuos Sólidos Ordinarios.

Reglamento sobre el manejo de residuos sólidos ordinarios N° 369093-S (2010)

Capítulo II Art. 7

Las municipalidades serán responsables de la gestión integral de los residuos sólidos ordinarios generados en su cantón, lo cual podrá realizar por administración o mediante contratos con empresas particulares. Además, las municipalidades deberán elaborar e implementar el plan municipal de gestión integral de residuos sólidos, deben contribuir a incorporar el principio de jerarquización de residuos sólidos dentro del municipio, así como debe promover la recolección separada de los residuos. Por otra parte, este artículo señala que las municipalidades deben promover la coordinación con empresas, cooperativas y otras organizaciones públicas y privadas para que se integren en el proceso de gestión de los residuos.

Capítulo V Art. 18

La recuperación de los residuos sólidos valorizables tiene como propósitos generales:

Incisos

a) Evitar la contaminación, la generación de gases de efecto invernadero, la afectación a la salud de la población.

b) Reducir la presión sobre los recursos naturales mediante el aprovechamiento racional de los mismos.

c) Reducir la cantidad de residuos sólidos a disponer finalmente.

En este reglamento se fija el papel de los gobiernos locales como encargados de implementar una gestión integral de los residuos, así como la importancia de este proceso. Adicionalmente, los municipios a lo interno tienen sus propios reglamentos en los que establecen las acciones a implementar en cuanto al manejo de desechos, por lo que se presenta también el reglamento Municipal para la Gestión Integral de Residuos del cantón de Escazú como muestra de las actividades que se realizan en este cantón.

Reglamento Municipal para la Gestión Integral de Residuos Sólidos en el cantón de Escazú (2015)

Capítulo III Art. 9 Categorías de residuos sólidos a separar

Residuos orgánicos fácilmente biodegradables, residuos de jardín.

Cap. III. Art 10. Recolección de residuos sólidos

Residuos orgánicos fácilmente biodegradables separados desde la fuente, se recolectarán hasta un máximo de tres estaciones por instancia o persona generadora por jornada ordinaria.

Cap. III. Art 11. Regularidad del servicio.

La frecuencia de recolección para los residuos orgánicos fácilmente biodegradables es de cada quince días.

Cap. III. Art 16 Centros de recuperación de materiales orgánicos fácilmente biodegradables.

El municipio tiene la facultad de operar centros de recuperación de materiales orgánicos fácilmente biodegradables o autorizar a terceras personas previamente calificadas para la acumulación, tratamiento de los mismos y comercialización del producto final.

Finalmente se presenta la Ley 7200 de Generación Eléctrica Autónoma o Paralela en la cual queda establecida la venta de la energía eléctrica proveniente de desechos sólidos municipales lo que abre mercado a la generación de este tipo de energía renovable en Costa Rica.

Ley 7200 Generación Eléctrica Autónoma o Paralela (2001)

Art. 1 La energía eléctrica generada a partir del procesamiento de desechos sólidos municipales podrá ser adquirida en forma directa por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) o la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), conforme a las tarifas aprobadas por el Servicio Nacional de Electricidad (SNE).

2.2. RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES

Para enmarcar el tema de los residuos sólidos se puede iniciar definiendo la palabra residuo ya que se ha abierto la discusión sobre como denominar a estos materiales que quedan posterior al uso o aprovechamiento de productos y de las actividades cotidianas y/o industriales. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), se define como residuos todo material (sólido, semi sólido, líquido o contenedor de gases) descartado, es decir, que ha sido abandonado, es reciclado o considerado inherentemente residual. Según el manual de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) para el Manejo Integral de Residuos Sólidos Domiciliarios de (2016) se pueden utilizar como sinónimos los términos desecho y residuo para denominar a lo que convencionalmente se conocía como basura, esto con base en la revisión de las definiciones de la Real Academia Española (Rondón et al, 2016). Este cambio en la terminología permite modificar el paradigma que la sociedad tiene en cuanto a los residuos sólidos, de modo que, se considere el aprovechamiento de los mismos como fuente de energía, como materia prima en procesos y que a la vez se trabaje en una gestión integral de los mismos que permita disminuir el impacto ambiental, social y a la salud.

Los residuos sólidos varían en cuanto a composición. Una parte importante de los mismos corresponde a los desechos orgánicos, los cuales son producto de la elaboración de alimentos, prácticas de poda y jardinería, residuos de madera, residuos industriales y municipales. Para el caso específico de Costa Rica, según el Plan Nacional de Residuos Sólidos PRESOL (2016), en 2006 se generaban 3784 toneladas de residuos ordinarios municipales por día, mientras que para 2011 este valor aumentó a 3995 aproximadamente y a 4000 toneladas diarias durante 2014, lo que permite predecir la tendencia de aumento en la generación de residuos. Dicha situación es preocupante y sugiere una urgente necesidad de implementar planes de gestión de residuos sólidos adaptados a los requerimientos de cada municipio. Por otra parte, este mismo documento afirma que actualmente se tiene una producción de 1,1 kilogramos de residuos por habitante por día (ppc). De estos residuos se ha estimado que un 55% corresponde a residuos orgánicos, 15,5% a papel y cartón y 11,5% a plásticos. Sin embargo, para obtener porcentajes de composición verdaderamente representativos se requieren estudios de composición a nivel de municipios, pero dado el alto costo de los mismos y la falta de personal encargado de realizarlos se tienen muy pocos datos en el país. De acuerdo con lo reportado por Mata (2014) para 2011 los cantones de Belén, Alajuela, Heredia, Desamparados, San Carlos y San Rafael han elaborado un estudio técnico de composición y generación de residuos sólidos, sin embargo, es necesario que los 81 cantones del país lo elaboren y mantengan actualizados para avanzar hacia una competitividad sostenible.

Los residuos sólidos orgánicos son una forma de biomasa, la cual se ha obtenido mediante procesos fotosintéticos que utilizan la luz solar para almacenar carbono en forma de azúcares, almidones, o como compuestos estructurales más complejos como son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina (colectivamente llamados lignocelulosa). La biomasa, a su vez se define como una serie de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se originan a partir de materia orgánica formada por la vía biológica (Gracia, Velázquez-Martí, & Estornell, 2014). Además, es fuente de energía renovable de origen solar a través de fotosíntesis de los vegetales y tiene características muy únicas debido a que puede ser

convertida, ya sea en bases de combustibles, otros productos químicos o utilizada para generación de electricidad (Coto, 2013). En el esquema de la figura 2.1 se puede visualizar el origen de la biomasa como una fuente de energía renovable.

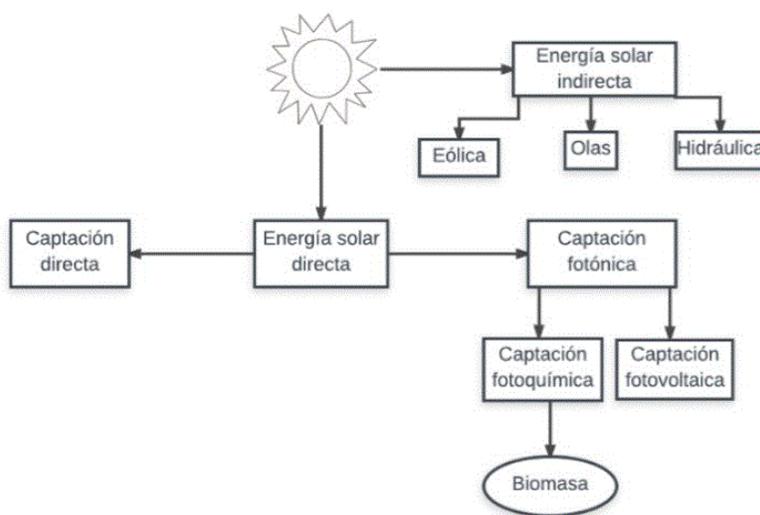


Figura 2.1 Energías renovables basadas en la energía primaria del sol. Adaptado de García (2013)

La producción y composición de los residuos orgánicos depende de la región geográfica, número de habitantes y su condición social, actividades económicas predominantes, hábitos regionales de alimentación y las variaciones del clima. Una propiedad física relevante de los residuos orgánicos es el tamaño de partícula. Esta influye de forma directa en los procesos de descomposición. Por ejemplo, partículas más grandes toman más tiempo en digerirse en condiciones anaerobias, lo cual requeriría más tiempo si se procesaran de esta manera para generar biogás. Otro parámetro importante es la densidad, ya que residuos con alta densidad contienen menos sustancias no deseadas (Campuzano & González-Martínez, 2016).

Los residuos de jardinería forman parte importante de los residuos sólidos municipales, provenientes principalmente de las áreas verdes de parque y jardines que mantienen una arquitectura de paisaje y contribuyen también en la decoración de hogares e instituciones públicas y privadas. Diversos países, entre los que destacan Estados Unidos y España, realizan prácticas de manejo de sus residuos de jardinería, efectuando un manejo holístico de los residuos orgánicos, transformándolos en materia orgánica aprovechable a través de diversas técnicas de conversión en energía y abonos, evitando así su disposición en sitios inadecuados y/o sus quemadas, lo que contribuye como impacto positivo al ambiente (Pérez & Martínez, 2008).

El uso de biomasa como fuente energética tiene la ventaja de que el CO₂ atmosférico es utilizado para la producción de sustancias como la celulosa y la lignina, las cuales a su vez pueden ser empleadas como combustible en procesos de combustión que liberan nuevamente el CO₂ a la atmósfera, lo cual equivale a un impacto casi neutro en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero (Roldán, 2012). Adicionalmente, Kumar, Jones, & Hanna (2009)

afirman que la biomasa es una fuente de energía renovable dado que, al ser más reactiva y poseer un mayor contenido de compuestos volátiles que los combustibles fósiles, los procesos de conversión térmica se dan a una menor temperatura y a menor temperatura se reducen las pérdidas de calor, las emisiones y la producción de residuos asociados a las altas temperaturas. Además, la biomasa tiene un bajo contenido azufre, lo que resulta en una baja emisión de óxidos de azufre (SO_x).

Adicionalmente, los efectos sobre la calidad del aire al disponer este tipo de residuos sólidos en un espacio abierto son preocupantes, ya que, al estar en contacto con agua y el oxígeno del aire estos residuos se degradan liberando gases como metano (CH₄) principalmente y en menor cantidad dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua (H₂O). (Colmenares & Santos, 2008). Tanto el CH₄ como el CO₂ son gases causantes del efecto invernadero, sin embargo, el metano tiene un potencial de calentamiento global de 21 mientras que el del CO₂ es de 1 (Instituto Meteorológico Nacional, 2017), por lo que es preferible utilizar esta biomasa en procesos de transformación energética hasta obtener CO₂.

2.2.1. Propiedades de los residuos orgánicos de jardinería

Los residuos de jardinería tienen una composición heterogénea que depende de las condiciones climáticas, lugar de generación, la urbanización y el tipo de espacios verdes. Estos factores influyen en las propiedades de estos residuos, determinando tasas de generación y composición (Shi et al., 2013).

Desde el punto de vista químico se pueden caracterizar los residuos orgánicos desde varios parámetros, entre ellos la humedad, el contenido de sólidos (totales, volátiles, fijos), relación carbono/nitrógeno y fósforo total. Estos son indicadores del contenido de nutrientes y materia orgánica y a la vez permiten predecir el valor teórico de la producción de metano (Campuzano & González-Martínez, 2016).

Los residuos orgánicos provenientes de jardinería o de la agroindustria, residuos de naturaleza lignocelulósica, son caracterizados por una estructura compleja y recalcitrante a la biodegradación, lo cual puede variar dependiendo del sustrato y puede actuar como una barrera a la biodegradación de dichos residuos (Pellera & Gidarakos, 2016).

En la literatura existen datos de referencia sobre el contenido de compuestos lignocelulósicos de ciertos residuos biomásicos, por ejemplo para hojas y residuos similares se tiene un contenido entre 15 y 20% de celulosa, 80-85% de hemicelulosa y un 0% de lignina (Flores, 2014). Con el propósito de utilizar la biomasa para fines energéticos existen dos caracterizaciones relevantes las cuales son el análisis próximo y el análisis elemental. Dichos análisis para residuos de jardinería se presentan en los cuadros 2.1 y 2.2.

Cuadro 2.1 . Análisis próximo de residuos de poda.

| Tipo de residuos | Análisis próximo (Porcentaje en masa) | | | |
|--------------------|---------------------------------------|-----------------|--------------|----------------|
| | Humedad | Materia volátil | Carbono fijo | No combustible |
| Residuos de jardín | 60 | 30 | 9,5 | 0,5 |

Tomado de (Huerta, 2012).

Cuadro 2.2 Análisis elemental de residuos de poda.

| Tipo de residuos | Análisis elemental (Porcentaje en masa) | | | | | Cenizas |
|--------------------|---|---------------|-------------|---------------|------------|---------|
| | Carbono (C) | Hidrógeno (H) | Oxígeno (O) | Nitrógeno (N) | Azufre (S) | |
| Residuos de jardín | 46 | 6 | 38 | 3,4 | 0,3 | 6,3 |

Tomado de (Huerta, 2012).

Otros autores han caracterizado residuos de poda obteniendo que los contenidos de cenizas promedio son de 34,14%, los de sólidos totales en 90,5% y 78,9 % de sólidos volátiles. La variación en el contenido de cenizas en la biomasa está relacionada a las condiciones de crecimiento de cada tipo de residuos en particular, así como varía según el tipo de minerales que se encuentran en la tierra donde ha sido cultivada o minerales que pueden ser introducidos durante la cosecha o en los procesos de recolección y transporte de la misma. La composición de las cenizas está dominada por dióxido de silicio (SiO_2) y óxido de calcio (CaO) y en menor cantidad por óxidos de magnesio (Mg), aluminio (Al), potasio (K) y fósforo (P). (Melissari, 2012). Adicionalmente, algunos investigadores determinaron el contenido de Carbono (C) en 31,15%, Hidrógeno (H) en 5,35%, Oxígeno (O) en 27,22%, Nitrógeno (N) en 1,91% y Azufre (S) en 0,23%. Estos valores están reportados en concentración de masa/masa. (Arteaga et al, 2015).

La densidad aparente es también una propiedad a considerar de los residuos orgánicos ya que para efectos de transporte o de secado de los mismos interviene en consideraciones técnicas y económicas. Un estudio realizado en Guatemala reportó que los valores de densidad aparente para residuos de jardín varían entre 59-225 kg/m^3 y que el valor promedio es de 101 kg/m^3 (Mejía, 2004).

Por otra parte, una de las principales propiedades en cuanto a aprovechamiento energético de residuos orgánicos se refiere es el poder calórico. Este es la unidad de medida de la energía contenida en un determinado material. Existen dos valores, el poder calórico inferior (LHV) el cual corresponde a la cantidad de calor liberado por la combustión de una cantidad específica de un combustible, inicialmente a 25 °C y el retorno de los productos de la combustión a 150 °C, el cual no considera el calor latente de la evaporación del agua. Por otra parte, el poder calórico superior (HHV) de un combustible es definido como la cantidad de calor liberado por una cantidad específica de un combustible una vez acabada la

combustión y los productos regresan a la temperatura de 25 °C, el cual toma en cuenta el calor latente de vaporización del agua en los productos de la combustión (U.S Department of Energy, 2015). Según Huerta (2012) el valor típico de contenido energético de residuos de jardinería es de 15117 kJ/kg con base en un estudio realizado a residuos institucionales. Autores como García et al (2012) establecen un valor de referencia óptimo para este parámetro de 20500 kJ/kg.

La caracterización de los residuos orgánicos de jardinería es importante para proporcionar apoyo de gestión y decisión en el proceso de selección y diseño de una tecnología de aprovechamiento energético de los mismos, así como optimizar los procesos de conversión en reactores adecuados. La biomasa como fuente energía, tiene la ventaja de que es considerada neutral respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero ya que crece a través de reacciones de fotosíntesis donde se fija el carbono, y además justamente por ese origen fotosintético este tipo de materiales tienen bajos contenidos de azufre y nitrógeno lo que se traduce en bajas emisiones de NO_x y SO_x (García et al., 2012).

2.2.2. Residuos de Jardinería de la Municipalidad de Escazú.

La Municipalidad de Escazú cuenta desde 2008 con un plan de gestión de residuos sólidos, el cual; con ayuda del programa de la Agencia de Consultoría y Medio Ambiente (CYMA) y la cooperación del gobierno de Alemania gestionada por la Asociación Centroamericana para la Economía, la Salud y el Ambiente (ACEPESA), se creó con la finalidad de implementar una gestión integral de residuos sólidos a nivel municipal. Esta entidad pública brinda un servicio de recolección de residuos ordinarios (domésticos), orgánicos (jardín), valorizables y no tradicionales a través de una flotilla vehicular de 11 unidades y 30 funcionarios. El servicio que se presta a la comunidad se realiza mediante rutas y horarios establecidos por la municipalidad, distribuidas dentro de los tres distritos del cantón, con una periodicidad de dos veces por semana para cada ruta establecida. Sin embargo, en el caso del servicio de residuos valorizables y orgánicos, se brinda de forma quincenal en las diferentes rutas, esto por concepto de disponibilidad de unidades de recolección. (P. Delgado, comunicación personal, agosto 23, 2016). La imagen de la figura 2.2 muestran las labores de recolección de los residuos de jardinería del cantón.



Figura 2.2 Ilustración del proceso de recolección de residuos de jardinería del cantón de Escazú.

En (2013), la Municipalidad de Escazú con la empresa Blanco y Sánchez (B y S) Consultores S.A realizaron un estudio de pesaje de residuos sólidos comerciales y de pesaje de residuos sólidos residenciales. El tamaño de la muestra seleccionado para el sector residencial fue de 180 viviendas, la determinación de los elementos muestreados fue estratificada por rutas, días de recolección de residuos y por distritos. Para el sector comercial la muestra fue de 53 elementos. Con base en el estudio realizado, se estimó la producción total de residuos en 21 461 520 kilogramos (kg) para el año 2013, además, afirman que esta cantidad aumentó un 65,9% con relación al estudio anterior realizado en 2002. En la producción residencial se obtuvo una producción anual total de 15 343 103 kg y representa el 71,49% del total producido en el cantón. Además, también se estimó la producción media anual por vivienda en 811 kg y que el servicio de recolección se brinda a 18918 viviendas en total. De manera complementaria, el total anual de residuos comerciales producidos fue de 6 118 417 kg. Este dato representa solamente el 28,51% del total de residuos comerciales producidos. La municipalidad recolecta los residuos de 2623 comercios para los cuales se estimó una producción media anual de 2332 kg por comercio. Otro de los principales aportes de este tipo de estudio fue la composición de los residuos sólidos generados, los cuales se muestran en las figuras 2.3 y 2.4 en donde aparecen gráficamente los tipos de residuos encontrados en las muestras analizadas tanto para el sector residencial como para el comercial, respectivamente.

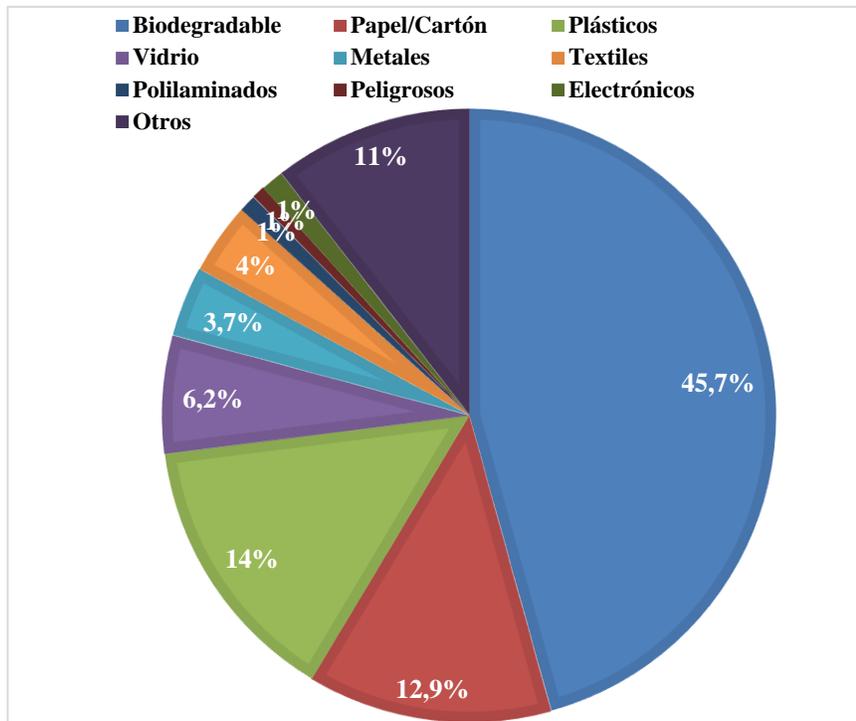
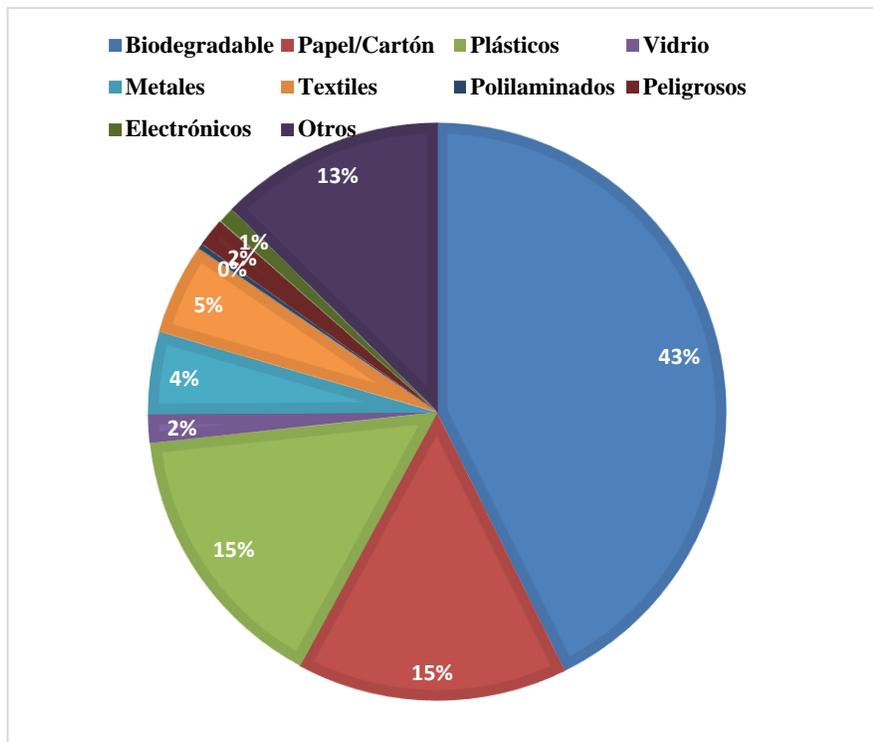


Figura 2.3 Composición de los residuos sólidos residenciales de la Municipalidad de Escazú. Adaptado de B y S Consultores S.A. (2013)

Figura



2.4

Composición de los residuos sólidos comerciales del cantón de Escazú. Adaptado de B y S Consultores S.A (2013)

Como se denota en las figuras 2.3 y 2.4, el principal componente de los residuos del cantón de Escazú es biodegradable, lo cual incluye residuos orgánicos producto de actividades de cocina, venta de alimentos, jardinería y otros. Sin embargo, los residuos orgánicos de jardinería, únicamente se han contabilizado desde 2011 ya que esta municipalidad brinda el servicio de recolección de este tipo de residuos orgánicos en forma exclusiva a partir de ese año. Este flujo de producción se puede observar en el cuadro 2.3 donde se presenta las cantidades de residuos sólidos de jardinería en toneladas, recolectadas por la Municipalidad de Escazú durante seis años.

Cuadro 2.3. Histórico mensual de recolección de residuos de jardinería de la Municipalidad de Escazú para un período de 5 años. Tomado de (Municipalidad de Escazú, 2017)

| Mes | Cantidad residuos orgánicos (ton) 2011 | Cantidad residuos orgánicos (ton) 2012 | Cantidad residuos orgánicos (ton) 2013 | Cantidad residuos orgánicos (ton) 2014 | Cantidad residuos orgánicos (ton) 2015 | Cantidad residuos orgánicos (ton) 2016 |
|-----------|--|--|--|--|--|--|
| Enero | 80,05 | 87,48 | 114,79 | 206,89 | 166,90 | 201,29 |
| Febrero | 89,55 | 115,16 | 103,92 | 125,63 | 137,05 | 164,49 |
| Marzo | 93,70 | 105,70 | 104,18 | 120,79 | 136,40 | 171,42 |
| Abril | 84,26 | 111,49 | 126,58 | 145,28 | 179,13 | 178,57 |
| Mayo | 130,02 | 210,57 | 196,22 | 163,15 | 195,46 | 212,81 |
| Junio | 150,26 | 151,35 | 174,36 | 311,66 | 269,71 | 311,33 |
| Julio | 148,51 | 130,00 | 187,52 | 203,05 | 230,31 | 189,14 |
| Agosto | 163,34 | 158,85 | 141,75 | 221,37 | 163,11 | 240,86 |
| Setiembre | 111,20 | 172,14 | 149,95 | 173,14 | 279,59 | 189,83 |
| Octubre | 145,91 | 158,56 | 174,17 | 177,12 | 245,42 | 215,61 |
| Noviembre | 86,17 | 146,95 | 142,35 | 167,19 | 236,64 | 487,13 |
| Diciembre | 90,75 | 84,14 | 79,10 | 108,97 | 264,12 | 418,85 |
| Total | 1373,71 | 1632,39 | 1694,89 | 2124,24 | 2503,84 | 2981,33 |

Estos residuos se recolectan dos veces al mes en todas las comunidades del cantón y son dispuestos en el Parque de Tecnología Ambiental Uruka, administrado por la empresa privada Berthier EBI de Costa Rica (P. Delgado, comunicación personal, agosto 23, 2016).

Para 2015, la municipalidad depositó 24 322 000 kilogramos de residuos sólidos en dicho relleno sanitario y estimó la producción per cápita de residuos sólidos en 0,9998 kg/hab-día. Esto se estimó con base en los residuos recolectados durante ese año y la población total del cantón que, según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), fue de 66 652 habitantes en ese año.

2.3. TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

Adicional a los desafíos ambientales que implican los residuos sólidos orgánicos, la inherente complejidad de su composición hace que sean una fuente atractiva de productos con valor agregado. Como se ha descubierto que los residuos orgánicos son una fuente no explotada de generación de energía renovable, se han llevado a cabo investigaciones sobre las tecnologías más adecuadas que permitan recuperar el potencial de los residuos orgánicos y a la vez reducir la carga ambiental de su eliminación (Pham et al., 2015).

El proceso total de conversión de la biomasa incluye la logística, el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica y el proceso de conversión. La logística incluye la recolección, el manejo, almacenamiento y transporte de la materia prima biomásica. Esta última ya es realizada por las municipalidades como parte de los servicios comunales que se brindan, sin embargo, el tratamiento con la finalidad de aprovechamiento energético para darle valor agregado a estos residuos es lo que se busca implementar para alcanzar una gestión integral de residuos sólidos (Rondón et al., 2016).

Las tecnologías que comprenden los procesos de conversión de la biomasa en energía dependen, entre otros factores, de la clase de biomasa, su contenido de humedad, las condiciones del proceso de conversión y el uso final del producto energético. Estas transformaciones pueden dividirse (de acuerdo con la naturaleza de los productos implicados) en procesos termoquímicos, procesos bioquímicos y extracción directa, lo cual hace referencia a la conversión mecánica (Pham et al., 2015). Los tipos de tecnologías disponibles para el aprovechamiento de residuos orgánicos y los principales productos se muestran en la figura 2.5.

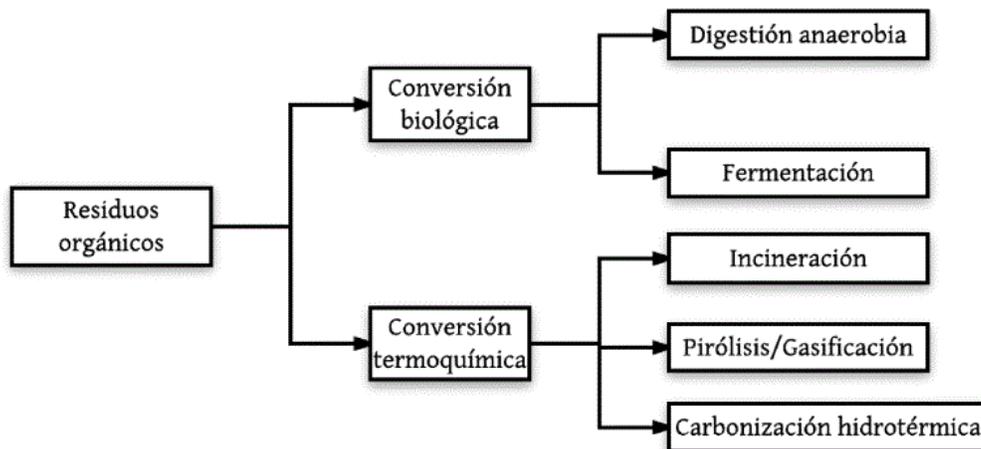


Figura 2.5. Tecnologías de conversión de residuos orgánicos en energía. Tomado de (Pham et al., (2015)

Cuando los contenidos de humedad son muy altos o los residuos se encuentran en forma de lodos, es posible pensar en el proceso de biodigestión, en el cual la biomasa es degradada a metano (CH_4), CO_2 y otros gases debido a una descomposición bacteriana del tipo anaeróbica (en ausencia de oxígeno). Contenidos de humedad inferiores al 60% permiten la combustión directa de la biomasa en hornos, mientras que por debajo del 20% de humedad es factible considerar procesos como la gasificación, en donde la biomasa es transformada en un gas sintético formado por el monóxido de Carbono (CO) y el hidrógeno (H_2) (Ramírez, Carazo, Roldán, & Villegas, 2007). Materiales lignocelulósicos de baja humedad (<40%), como paja de cereales, restos de poda, cáscaras de frutos secos, aserrín, etc., generalmente utilizan la gasificación como proceso para su aprovechamiento energético (Agrowaste & Centro Tecnológico Nacional de la conserva y alimentación., s. f.).

Existen varios criterios para comparar las tecnologías de aprovechamiento de estos residuos, Pham et al. (2015) presentan algunos, así como las condiciones del proceso de conversión, los principales productos y subproductos, y los costos de instalación de todo el equipo y materiales necesarios. Además, como se mencionó anteriormente, el contenido de humedad del sustrato es un factor determinante, así como la viabilidad legal de la tecnología y el acondicionamiento de los residuos a utilizar como alimentación de los procesos. Otro criterio, es la ubicación de las plantas de procesamiento y conversión, ya que estas deben ubicarse próximos a su fuente de obtención minimizando las distancias de transporte y sus costos asociados (se recomienda menor a 100 km). Una comparación general de las principales tecnologías disponibles presentes en el mercado se presenta en el cuadro 2.4

Cuadro 2.4. Criterios de comparación de cuatro tecnologías de aprovechamiento de residuos orgánicos.

| Proceso de conversión | Condiciones del proceso de conversión | Viabilidad legal | Costos | Principales productos | Referencia |
|-----------------------|---|---|-----------|---|--|
| Incineración | Humedad de 20% o menos. Temperatura de operación (400-540) °C. Tecnología madura. | Existe el decreto 391316-S-MINAE que regula las condiciones de operación y control de las emisiones de las instalaciones para la coincineración de residuos sólidos ordinarios. Con coincineración hace referencia a los tratamientos térmicos de residuos incluyendo la combustión directa, pirólisis, incineración y gasificación. Sin embargo existe una acción de inconstitucionalidad contra este decreto dado que varias municipalidades tenían proyectos de incineración de residuos sólidos ordinarios y se fundamentan en que si se implementan este tipo de sistemas se disminuiría las prácticas de reciclaje y reducción de residuos. | 210\$/MWh | Calor y electricidad | (Anderson et al., 2016) (IRENA, 2012) |
| Pirólisis | Temperatura de operación entre (400-800) °C. Requiere un combustible auxiliar en el arranque del proceso. Tecnología madura. | Existe el decreto 391316-S-MINAE que regula las condiciones de operación y control de las emisiones de las instalaciones para la coincineración de residuos sólidos ordinarios. Con coincineración hace referencia a los tratamientos térmicos de residuos incluyendo la combustión directa, pirólisis, incineración y gasificación. Sin embargo existe una acción de inconstitucionalidad contra este decreto dado que varias municipalidades tenían proyectos de incineración de residuos sólidos ordinarios y se fundamentan en que si se implementan este tipo de sistemas se disminuiría las prácticas de reciclaje y reducción de residuos. | 178\$/MWh | Coque de petróleo, aceite y alquitranes, gases (CO, CH ₄ , H ₂ , CO ₂) | (Pham et al., 2015) (Vaish et al., 2016) (IRENA, 2012) |
| Gasificación | Permite tratar biomasa lignocelulósica. Humedades menores 30%. Requiere reducción del tamaño de partícula del sustrato. Existen varios casos de éxito sobre gasificación de biomasa en el país. En su mayoría todo el carbono de la biomasa se convierte en syngas. El syngas puede ser producido a partir de cualquier materia prima hidrocarbonada. | Existe el decreto 391316-S-MINAE que regula las condiciones de operación y control de las emisiones de las instalaciones para la coincineración de residuos sólidos ordinarios. Con coincineración hace referencia a los tratamientos térmicos de residuos incluyendo la combustión directa, pirólisis, incineración y gasificación. Sin embargo existe una acción de inconstitucionalidad contra este decreto dado que varias municipalidades tenían proyectos de incineración de residuos sólidos ordinarios y se fundamentan en que si se implementan este tipo de sistemas se disminuiría las prácticas de reciclaje y reducción de residuos. | 240\$/MWh | Gases (CO, H ₂ , CO ₂ , N ₂ y otros dependiendo de las condiciones del proceso) y cenizas. | (Speight, 2016) (Vaish et al., 2016) (IRENA, 2012) |
| Degradación anaerobia | Biomasa con alto contenido de humedad. Temperatura de operación entre (35-55) °C. Materiales lignocelulósicos requieren pretratamientos para mejorar el rendimiento de la metanogénesis. | No existe ningún estatuto legal que regule esta actividad, sin embargo, la Ley 8839 para la Gestión Integral de Residuos autoriza la actividad de valorizar los residuos mediante su aprovechamiento energético. | 290\$/MWh | Biogás (CH ₄ , CO ₂) | (Pavi et al., 2017) (Pham et al., 2015) (IRENA, 2012) |

2.3.1. Transformaciones termoquímicas

Según Pandey et al. (2015) los métodos de conversión termoquímica pueden ser rápidamente implementados en países desarrollados y en desarrollo, ya que tienen mayores retornos económicos con respecto a los procesos bioquímicos.

Los procesos termoquímicos consisten en la descomposición del sustrato carbonoso en presencia de calor, convirtiendo las moléculas complejas (lignocelulosa) en gases combustibles, aceites y otros productos sólidos que tienen algún valor energético. Estos procesos pueden darse en un ambiente rico o pobre en oxígeno, así como a diferentes temperaturas. Las conversiones termoquímicas incluyen combustión, pirólisis, gasificación, incineración, entre otros. Sin embargo, la gasificación es una de las tecnologías más económicas y eficientes para la conversión de biomasa en energía (de Lasa, Salaices, Mazumder, & Lucky, 2011)

Gasificación

La gasificación es la conversión de un sustrato carbonoso (carbón, biomasa, restos agrícolas, plástico, etc.) mediante calentamiento a altas temperaturas, para la obtención de un gas combustible o un material con potencial a ser quemado y así liberar energía. Otra alternativa, es la generación de gases y su utilización para la producción de sustancias químicas de valor agregado. Este proceso es el resultado de una serie de reacciones químicas que ocurren en presencia de un agente gasificante (generalmente aire) en un ambiente limitado en oxígeno (Basu, 2010).

En este proceso, además del gas generado se obtiene una fase sólida. La fase gaseosa, usualmente llamada “syngas”, posee un alto poder calórico que puede ser utilizado para generación de energía o producción de biocombustibles (Molino, Chianese, & Musmarra, 2016). Por otra parte, la fase sólida usualmente conocida como “char” o carbón, en español, incluye la fracción orgánica no alterada y el material inerte presente en la biomasa tratada. El syngas es una mezcla de monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) así como hidrocarburos ligeros tales como el etano y el propano, e hidrocarburos pesados como el alquitrán, que condensan a temperaturas entre 250 °C y 300 °C (Basu, 2010).

La gasificación como tal es un proceso estrechamente relacionado con la combustión. Sin embargo, existe una diferencia importante que se debe considerar y es que la gasificación guarda la energía en los enlaces químicos del gas producido mientras que la combustión rompe esos enlaces para producir energía. Los procesos de gasificación añaden hidrógeno y separan el carbono de la materia prima para producir gases con una alta relación hidrógeno-carbono (H/C) mientras que la combustión oxida el hidrógeno y el carbono para producir agua y dióxido de carbono, respectivamente (Basu, 2010).

Por otra parte, se debe destacar que los principales factores que influyen en el rendimiento o composición del syngas corresponden al tipo de agente gasificante, la relación entre el flujo de biomasa y agente gasificante (que se determina a partir de la relación de equivalencia), la temperatura de operación del gasificador y la configuración del reactor. Así, estos se deben definir adecuadamente para mejorar el rendimiento del proceso.

La ventaja de la gasificación es que el hecho de utilizar el syngas (gas de síntesis) como combustible es potencialmente más eficiente que la combustión directa de la biomasa inicial ya que puede ser quemado y expandido a altas temperaturas o usado en celdas de combustible, de modo que la eficiencia termodinámica es mayor (Aresta, Dibenedetto, & Dumeignil, 2012).

Etapas de la gasificación

El proceso global consta de los pasos de secado, descomposición térmica o pirólisis, combustión parcial de gases, vapores y craqueo del coque o char; y finalmente, la gasificación o reducción de productos de descomposición. Estas etapas del proceso se pueden observar en la figura 2.6 que ilustra los procesos, así como las temperaturas y productos de cada etapa.

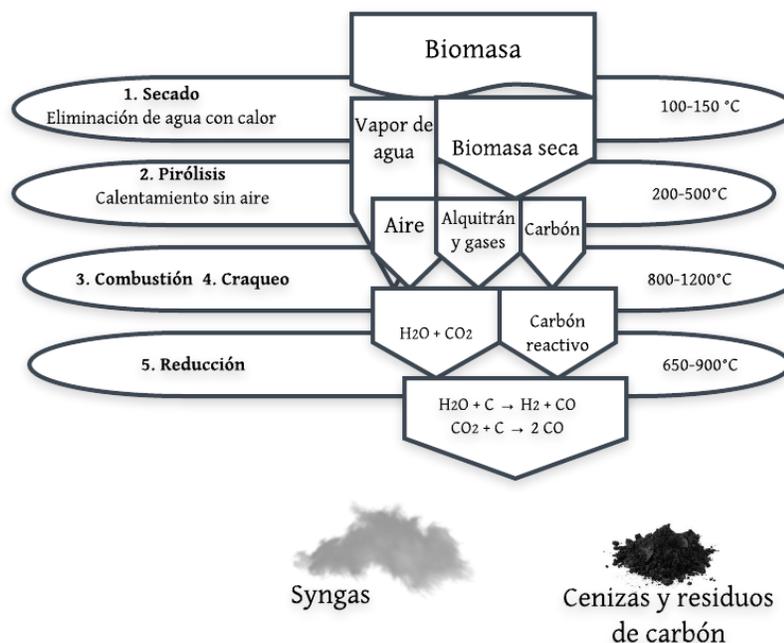


Figura 2.6 Etapas del proceso de gasificación. Adaptado de (ALL POWER LABS, 2017).

La etapa de secado es uno de los puntos críticos para la eficiencia global del proceso ya que cada kilogramo de humedad en la biomasa requiere un mínimo de 2260 kJ de energía extra del gasificador para vaporizar el agua (Basu, 2010). Por lo que es preferible humididades del

20% o menos en la biomasa de alimentación al sistema. Como se muestra en la figura 2.6, la etapa de secado se lleva a cabo en un rango de temperatura entre (100-150) °C.

La pirólisis, es la ruptura térmica de las moléculas complejas (hicrocarbonadas) de la biomasa en moléculas gaseosas pequeñas (condensables y no condensables) y en la cual no existe reacción química con ningún agente gasificante. Como principales productos se obtienen gases volátiles (vapor de agua, CO₂) y el char o coque. El char y el alquitrán son producto de la combustión incompleta de la biomasa (Kumar, Jones, & & Hanna, 2009).

Posteriormente, en las etapas señaladas como 3, 4 y 5 en la figura 2.6, el char reacciona con el agente oxidante para producir H₂, CO y CH₄. La composición de estos gases en la corriente del gas de síntesis depende del tipo de agente gasificante utilizado.

Los agentes oxidantes usualmente utilizados son aire, vapor de agua, nitrógeno (proveniente del aire), dióxido de carbono, oxígeno o una combinación de estos. Si se utiliza vapor de agua se obtiene un mayor rendimiento del hidrógeno en la composición del gas de salida por el contrario si se utiliza oxígeno se potencia el rendimiento del CO y CH₄. Por otra parte, si no es aceptable el nitrógeno en la corriente del syngas no se debe utilizar el aire como agente oxidante, sin embargo, es el agente de menor costo económico (Luque et al., 2016).

Las reacciones principales en la gasificación son endotérmicas y la energía requerida es obtenida a través de procesos alotermos o autotermos. En los métodos autotermos, el gasificador es calentado internamente a través de la combustión parcial de la biomasa, por el contrario, en la fase aloterma la energía requerida es brindada externamente (Molino, Chianese & Musmarra, 2016).

Aunque las reacciones que ocurren dentro de la gasificación dependen del tipo de biomasa y de su descomposición térmica en presencia del agente gasificante que se emplee, las principales reacciones que ocurren se representan en el cuadro 2.5. Estas reacciones son el medio para conocer el origen de los gases que componen el gas de síntesis.

Cuadro 2.5 Reacciones químicas del proceso de gasificación.

| Tipo de reacción | Reacción |
|---|--|
| Reacciones de Carbono | |
| R1 (Reacción de Boudouard) | $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172 \text{ kJ/mol}$ |
| R2 (Reacción de agua-gas) | $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131 \text{ kJ/mol}$ |
| R3 (Hidrogasificación) | $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 - 74.8 \text{ kJ/mol}$ |
| R4 | $C + 0.5O_2 \rightarrow CO - 111 \text{ kJ/mol}$ |
| Reacciones de oxidación | |
| R5 | $C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394 \text{ kJ/mol}$ |
| R6 | $CO + 0.5 O_2 \rightarrow CO_2 - 284 \text{ kJ}$ |
| R7 | $CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2 - 803 \text{ kJ/mol}$ |
| R8 | $H_2 + 0.5 O_2 \rightarrow H_2O - 242 \text{ kJ/mol}$ |
| Reacción de cambio | |
| R9 | $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2 \text{ kJ/mol}$ |
| Reacciones de metanación | |
| R10 | $2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247 \text{ kJ/mol}$ |
| R11 | $CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O - 206 \text{ kJ/mol}$ |
| R14 | $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2 - 165 \text{ kJ/mol}$ |
| Reacciones de transformación del vapor | |
| R12 | $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 + 206 \text{ kJ/mol}$ |
| R13 | $CH_4 + 0.5 O_2 \rightarrow CO + 2H_2 - 36 \text{ kJ/mol}$ |

Tomado de Basu (2010).

Variables como el sustrato carbonoso de origen y el agente gasificante determinan el mayor o menor poder calórico del gas. Para elegir el proceso de gasificación hay que tener en cuenta factores como la capacidad de procesamiento, las características de la biomasa a gasificar, utilización de gas, la facilidad de construcción y la operación del gasificador.

La eficiencia del proceso de gasificación se encuentra frecuentemente en un rango entre 70% y 80% y su variabilidad está asociada al tipo de tecnología, el combustible y el agente gasificante empleado en el proceso (Durango, 2015).

Según el informe elaborado por Agrowaste, Agrupal y el Centro tecnológico de la Conserva y Alimentación (s. f.) se prefieren los gasificadores de flujo directo para potencias de 1 MW o menos y para potencias superiores los gasificadores de lecho fluidizado.

Tecnologías para la gasificación

Se han desarrollado tres principales tecnologías para la operación del sistema de gasificación según el tipo de gasificador. En la figura 2.7 se denotan estas tecnologías, que describen el funcionamiento básico de cada tipo de sistema, así como los diferentes tipos de gasificadores según la tecnología.

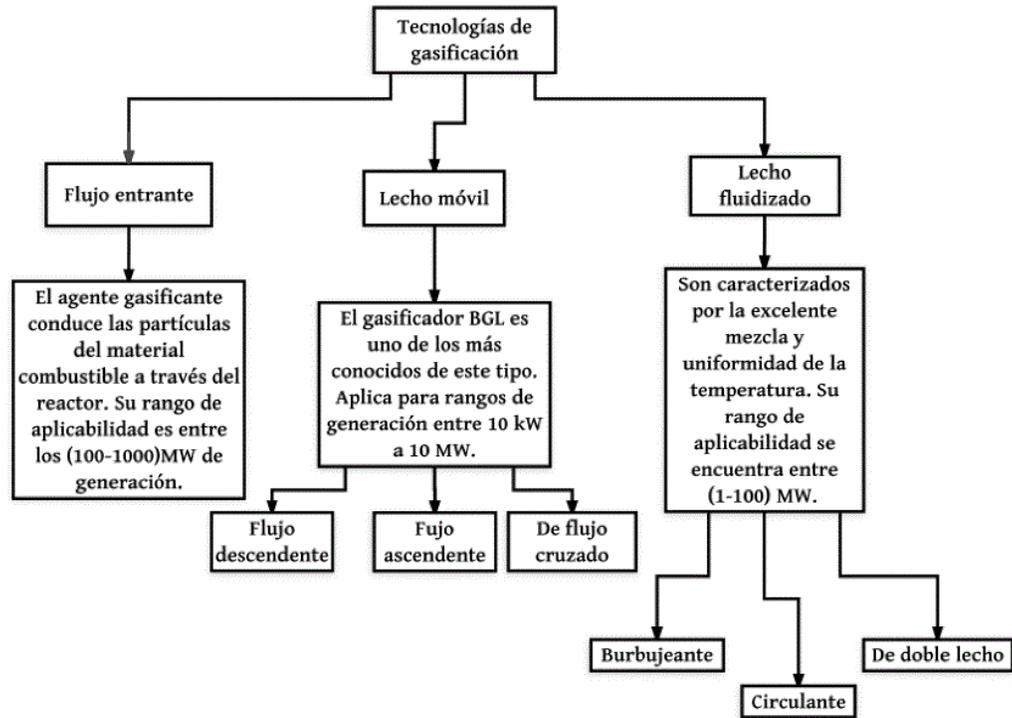


Figura 2.7 Tecnologías de gasificación. Adaptado de (Basu, 2010)

La selección del tipo de gasificador depende de la biomasa a gasificar, la densificación y contenido de metales y lignina de la misma, los contenidos de humedad, entre otros. Existen varias configuraciones o tipos de reactores para la producción de gas y cuentan con diferentes ventajas y desventajas. Un factor a considerar es la cantidad de alquitrán que se produce conjuntamente con el gas, la cual depende de la temperatura de gasificación, así como del diseño del gasificador. Para un gasificador dado, la cantidad del contenido de alquitrán (en porcentaje de masa seca de biomasa) por lo general se reduce con la temperatura (Molino, Chianese & Musmarra, 2016).

Tipos de gasificadores

Gasificadores de flujo entrante

En este tipo de sistemas la biomasa (combustible) es conducida a través del reactor por el agente gasificante. Los reactores de este tipo operan por lo general a una temperatura de 1400 °C y a presiones entre 20 y 70 bar. En los gasificadores de flujo entrante, la reacción de combustión identificada como R5 en el cuadro 2.5 se lleva a cabo justo en el punto de entrada con el agente gasificante, seguida por la reacción R4, que ocurre más abajo en el reactor donde el exceso de oxígeno es utilizado. Para la inyección de la biomasa dentro del reactor es necesario pulverizarlo hasta un tamaño menor a 75 micrómetros o lo que es equivalente a 75×10^{-6} m. Los tipos de gasificadores de flujo entrante se clasifican según la forma y lugar en que la biomasa es introducida en el reactor (Basu, 2010). Los dos principales gasificadores de este tipo se ilustran en la figura 2.8

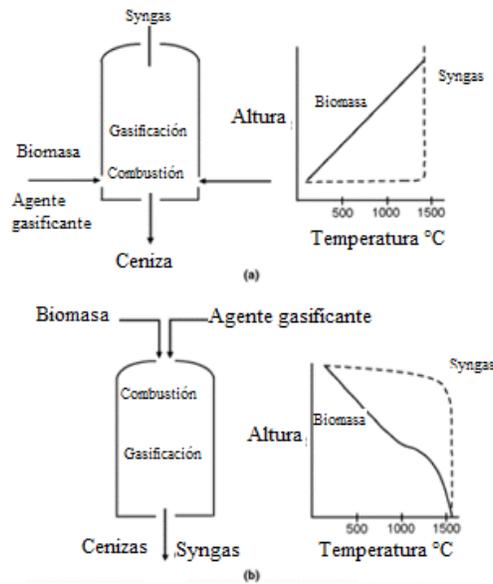


Figura 2.8 Tipos de gasificadores de flujo entrante: (a) Alimentado lateralmente y (b) Alimentado en la parte superior. Adaptado de Basu (2010).

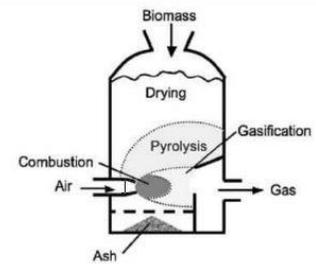
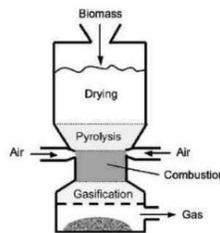
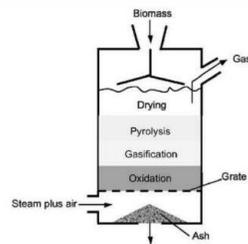
Gasificadores de lecho móvil

Este tipo de sistemas pueden ser construidos en pequeñas escalas lo cual es una de sus principales ventajas. La configuración y particularidades de estos sistemas dependen de la dirección del flujo tanto de biomasa como de agente gasificante, lo cual se presenta en el cuadro 2.6

Cuadro 2.6 Características de los diferentes gasificadores de lecho móvil.

| Sistema | Flujo ascendente | Flujo descendente | Flujo cruzado |
|----------------------|---|---|---|
| Generalidades | El agente gasificante ingresa desde la parte inferior del reactor y se mueve hacia arriba mientras la cama de combustible (biomasa) fluye hacia abajo, de modo que, el gas y los sólidos van en contracorriente. La biomasa debe tener un tamaño entre (5-100) mm en la alimentación. | El combustible ingresa por la parte superior del gasificador y a una cierta altura del mismo el agente gasificante ingresa, produciéndose un flujo a favor de la corriente hacia abajo del reactor donde se da la salida del gas producido. | El combustible ingresa por la parte superior del reactor y el agente gasificante es inyectado a través de una boquilla ubicada a un lado del reactor. La diferencia con los dos anteriores es que este reactor libera el gas producido de la pared opuesta a la entrada del agente gasificante. |
| Ventajas | <p>El gas de salida tiene una temperatura de 100 °C y un LHV entre (5-6) MJ/Nm³.</p> <p>Alta eficiencia térmica, son adecuados para altos contenidos de ceniza (25% o más).</p> <p>Admite biomasas con alto contenido de humedad.</p> | <p>Admite humedades de 25% como máximo y requiere tamaños de biomasa entre (20 - 100) mm. El gas de salida tiene una temperatura de 700 °C y un rango de LHV de (4,5 - 5) MJ/Nm³.</p> <p>Alta conversión del carbono.</p> <p>Baja producción de alquitranes.</p> | <p>Admite biomasas con humedades entre (10 - 20) % y tamaños entre (5 - 20) mm.</p> <p>Baja producción de alquitranes por lo que requiere un sistema simple de limpieza del gas. El tiempo de arranque del sistema es menor que en los dos anteriores.</p> |
| Desventajas | <p>Alto contenido de alquitranes en el syngas.</p> <p>Baja producción de CO y H₂.</p> | <p>Requiere uniformidad de tamaños en la alimentación.</p> <p>Requiere un estricto control de la temperatura en el reactor.</p> | <p>Sistemas de pequeña escala.</p> |

Esquema representativo



Adaptado de (Basu, 2010; Molino, Chianese & Musmarra, 2016)

Gasificadores de lecho fluidizado

Este tipo de sistemas son diferenciados por la excelente mezcla y uniformidad de la temperatura. El lecho fluidizado está hecho de sólidos granulares, llamados materiales del lecho, los cuales se mantienen en un estado de suspensión (fluidizado) por el paso del agente gasificante a velocidades apropiadas. Esta fluidización permite la excelente mezcla de sólido-gas, además, la uniformidad de la temperatura reduce el riesgo de aglomeración del combustible. Este sistema presenta ventajas particulares para la gasificación de biomasa así como para la transformación de alquitranes (Molino, Chianese & Musmarra, 2016).

Dentro del reactor, el agente gasificante es inyectado a través del lecho de partículas sólidas y el combustible es introducido por la parte inferior del gasificador, mezclándose y calentándose con el lecho hasta igualar su temperatura y así, obtener una mezcla de gases.

Lecho fluidizado burbujeante

En este sistema el lecho consiste en un material inerte que se mantiene fluidizado por el agente gasificante, que se inyecta en la parte superior a través de una rejilla a una velocidad entre (1-3) m/s. En estas condiciones el lecho se comporta como un líquido y es continuamente movido por la presencia de burbujas de gas lo cual asegura el intercambio de materia y calor entre el sólido y el gas (Basu, 2010).

El agente gasificante es inyectado en diferentes niveles del reactor, el lecho se mantiene a una presión de 10 bar mientras que la temperatura se debe mantener alrededor de 800 °C para evitar la fusión de las cenizas. Un esquema representativo de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante a altas temperaturas se presenta en la figura 2.9, en la cual se indican las zonas de ingreso tanto de la biomasa como del agente gasificante, así como las zonas de reacciones que ocurren dentro del reactor.

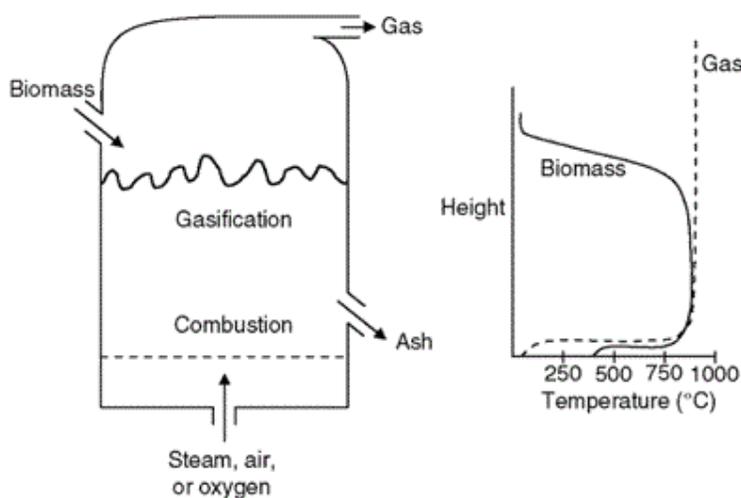


Figura 2.9. Esquema representativo de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante. Adaptado de (Basu, 2010).

Este sistema tiene como ventajas que asegura un excelente control de la temperatura y un eficiente contacto gas-sólido. Sin embargo, presenta pérdidas de carbón en las cenizas y requiere pretratamiento para materiales heterogéneos (Molino, Chianese & Musmarra, 2016).

Lecho fluidizado recirculante

Este sistema se compone típicamente de una columna ascendente, un ciclón y un recirculador de sólidos. El agente gasificante es inyectado en un flujo ascendente, a altas velocidades, entre (3,5-5,5) m/s, lo cual da lugar al estado de fluidización en el reactor. Por otra parte, la biomasa es inyectada a través de una de las paredes del reactor y mezclada con el material caliente del lecho, el cual está distribuido en toda la altura del reactor. La columna opera típicamente a temperaturas entre 800 °C y 1000 °C. El gas caliente que sale del gasificador pasa a través de un ciclón, que permite el recirculado de las partículas que se desprendieron del lecho y que son inyectadas nuevamente en el fondo del gasificador. Este sistema es ideal para gasificación de biomasa ya que garantiza largos tiempos de residencia del gas, lo cual lo hace aplicable para biomasa o combustibles con alto contenido de material volátil (Basu, 2010).

La tecnología de lecho fluidizado recirculante produce baja cantidad de alquitranes y permite altos porcentajes de conversión de la biomasa. Como parte del pretratamiento requerido se debe tener, en la alimentación al sistema, tamaños de partícula menores a 10 mm y humedades entre (5-60) % de su masa (Molino, Chianese & Musmarra, 2016).

Adicionalmente, este sistema asegura un mayor contacto entre el gas y el sólido, en comparación con el sistema burbujeante, debido justamente a la ausencia de burbujas. El recirculado de los sólidos permite que la biomasa sea calentada a mayores velocidades por lo que la eficiencia de la gasificación y la descomposición térmica del carbono incrementan en relación con el sistema burbujeante (Luque et al., 2016). El esquema representativo de las partes y funcionamiento de este tipo de tecnología se presenta en la figura 2.10

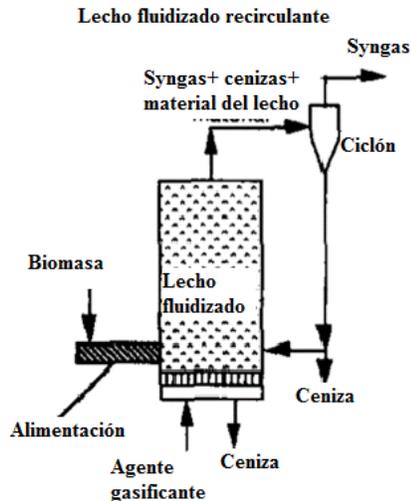


Figura 2.10 Gasificador de lecho fluidizado recirculante Adaptado de Basu (2010).

2.3.2. Plantas de gasificación

Las plantas de gasificación son plantas de pequeña potencia diseñadas para su utilización en áreas cercanas al punto de producción de la biomasa. Se les conoce como plantas de gasificación integrada en ciclo combinado, que incluyen como mínimo, un secador de biomasa, la cámara de gasificación y el generador de turbina alimentado por la combustión del syngas, que se lleva a cabo en motores de combustión interna. Esta tecnología integrada es una forma de generación de energía limpia y además posee reducidos costos de inversión en comparación con plantas de combustión convencional (Pandey et al, 2011).

Los motores de combustión interna son máquinas capaces de transformar la energía química de combustibles líquidos y gaseosos en energía mecánica o eléctrica. Son motores totalmente térmicos en los que los gases resultantes de la combustión empujan el pistón desplazándolo en el interior del cilindro y a su vez haciendo girar el cigüeñal, el cual, conectado al generador produce la electricidad (Durango, 2015).

Este tipo de plantas presentan la ventaja de tener un consumo total de agua menor que el de las plantas convencionales de generación eléctrica (Basu, 2010).

Plantas de gasificación en Costa Rica

Existen algunas plantas de gasificación con residuos sólidos orgánicos en el país, por ejemplo, el Instituto Costarricense del Café (ICAFFE), que genera energía eléctrica a partir de la broza del café para autoconsumo, además, aprovecha el calor generado en el proceso para el secado del grano. Generan 0,46 kWh/ kg de broza procesado y a través de investigaciones demostraron que utilizar este proceso para el aprovechamiento de este residuo genera menor cantidad de emisiones de CO₂ en comparación con el compostaje, que era la práctica habitual para el tratamiento de los mismos. Esto se debe a que durante esa práctica se generan emisiones de CH₄, CO₂ y óxido nitroso (N₂O), los cuales son gases que provocan el efecto invernadero. El potencial de calentamiento global del metano es de 21 mientras que el del

óxido nítrico es de 310, muy superiores al del CO₂ cuyo potencial es de 1 (Instituto Meteorológico Nacional, 2017). Por lo que se puede afirmar que tratar los residuos mediante gasificación obteniendo CO₂ como residuo tiene menor impacto sobre el calentamiento global que el proceso de compostaje.

Por otra parte, Coopedota, la cooperativa de café en Santa María de Dota, también ha implementado una planta de gasificación con la broza del café y en la cual produce aproximadamente 30,41 kW/h. Otro proyecto de gasificación en Costa Rica es el de aprovechamiento del rastrojo de la piña para generación eléctrica, desarrollado por la Universidad de Costa Rica (UCR). Siguiendo en el campo de las universidades estatales, la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica también posee un gasificador para chips de madera a pequeña escala, en el cual se genera 6.3 kW de potencia real.

2.4. COSTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE LA BIOMASA

Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (2012), para hacer un análisis de costos o rentabilidad de la obtención de electricidad a partir de biomasa se debe tomar en consideración el costo del equipo e inversión inicial, la tasa de descuento, la vida económica del proyecto, eficiencia o generación de la planta, costos de operación y mantenimiento, costos de transporte de la biomasa, entre otros que dependen de la tecnología implementada.

En 2008, Coopedota con el apoyo de la Alianza en Energía y Ambiente con Centroamérica, elaboraron un proyecto donde evaluaron la factibilidad económica de un sistema de gasificación de broza de café y en el cual tomaron en cuenta el valor de la construcción del sistema de gasificación y generador eléctrico, costos de instalación, materiales, mano de obra, capacitación de operarios y mantenimiento de los sistemas instalados. Como ingresos consideraron la venta de la energía producida al ICE. Además, consideraron un periodo de vida del proyecto de 5 años para la estimación del flujo de caja

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE ESTUDIO

El cantón de Escazú es el segundo de la provincia de San José, se ubica 8 km al suroeste de la ciudad de San José. Limita al norte con San José (Pavas), al sur con Acosta, al este con Alajuelita y al oeste con Santa Ana. Está dividido en tres distritos, San Rafael que consta de un área de 13,06 km², el distrito de San Antonio con un área de 17,15 km² y por último el distrito central con una extensión de 4,6 km². El área total corresponde a 34,81 km² (Municipalidad de Escazú, 2016).

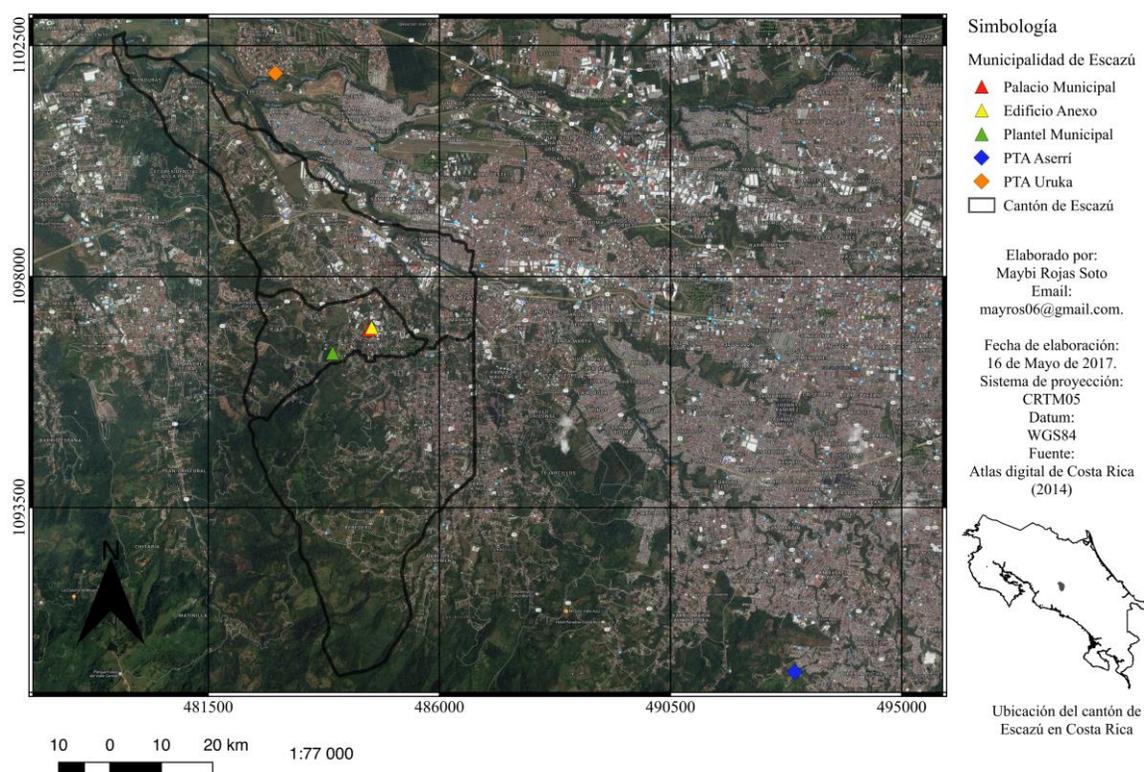


Figura 3.1 Ubicación de la Municipalidad de Escazú dentro del cantón.

En la figura 3.1 se puede observar el cantón de Escazú, en este se señala la ubicación de las diferentes instalaciones de la municipalidad. Los lugares señalados con rombos, identificados con la simbología PTA (siglas de Parque de Tecnología Ambiental), corresponden a los rellenos sanitarios ubicados en las zonas aledañas al cantón. El Departamento de Servicios Comunales, el cual es encargado de la recolección de los residuos se encuentra ubicado en el Plantel Municipal, mismo sitio del cual salen los camiones recolectores a realizar el recorrido de recolección de los residuos. Para los residuos de jardinería se tienen establecidas 9 rutas

principales las cuales son: Guachipelín, Zona Franca, Trejos, Las vistas, Bello Horizonte, Laureles, Jaboncillos, Mayorca y San Antonio. Cada ruta se visita dos veces al mes.

Según los datos históricos para las condiciones climatológicas de esta zona, se tiene una temperatura media de 21 °C y una precipitación que varía 328 mm entre el mes más seco y el más húmedo, siendo enero el más seco con 11 mm aproximadamente y octubre el más lluvioso con 339 mm. La humedad relativa promedio reportada para esta zona es de 90% (Instituto Meteorológico Nacional, 2016).

3.2. DISEÑOS DE EXPERIMENTOS

3.2.1. Determinación de características de residuos de jardinería de la Municipalidad de Escazú.

Para determinar las propiedades físicas de los residuos en estudio se procedió a tomar una muestra representativa de los residuos generados. Las muestras se recolectaron durante el mes de febrero del año 2017. Partiendo del hecho de que la municipalidad recolecta estos residuos en 9 rutas distintas, se tomó una muestra representativa de cada ruta. Es válido destacar que la recolección se realiza para 5 rutas la primera semana del mes y para las restantes en la segunda semana del mes, por lo que las muestras no fueron recolectadas el mismo día. Los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Anatomía de la Madera de la Escuela de Ingeniería Forestal y en el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), ambos del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago. En esta sección se presentan los métodos utilizados para llevar a cabo las caracterizaciones de contenido de humedad, poder calórico y contenido de material volátil. Las demás propiedades relevantes de los residuos como el análisis elemental, el análisis próximo, la densidad y el contenido de cenizas fueron obtenidas de la literatura. Dichas características son consideradas relevantes para la determinación de aprovechamiento energético.

Contenido de Humedad

Se procedió a realizar el análisis por duplicado a cada muestra representativa de cada ruta. El análisis se realizó en un analizador de humedad Ohaus modelo MB45-2A0. Este instrumento es un medidor halógeno que efectúa las mediciones de acuerdo con el principio termogravimétrico, donde la humedad se determina a partir de la pérdida de masa de la muestra secada por calentamiento. Este analizador dispone de una balanza de precisión y una unidad halógena, que permite el calentamiento rápido de la muestra y por consiguiente la disponibilidad casi inmediata de los resultados. Los análisis se realizaron a una temperatura de 105 °C (OHAUS, 2010). El contenido de humedad también se puede determinar siguiendo el procedimiento de la norma *ASTM E871* (ASTM International, 2013). Las fotografías del equipo y de las pruebas realizadas se pueden observar en la sección de anexos. (Ver anexo 1)

Poder Calórico.

De las mismas muestras tomadas para la determinación de humedad, se procedió a determinar por triplicado el poder calórico siguiendo el método analítico *ASTM D2015-96*. Este método utiliza un calorímetro de bomba adiabática con flujo de oxígeno bajo condiciones de

temperatura y presión controladas, estandarizado con ácido benzoico (ASTM International, s. f.). El calorímetro de bomba utilizado fue el PARR 6725 adaptado al termómetro calorimétrico PARR 6772. Las fotografías del equipo utilizado y de las pruebas se presentan en la sección de anexos. (Ver anexo 2).

Contenido de materia volátil

Se determinó este parámetro mediante lo establecido en la norma *ASTM E872-82* (2013). El procedimiento consiste en la determinación del porcentaje de productos gaseosos a partir de la cuantificación de la pérdida de peso resultante del calentamiento de la muestra bajo condiciones controladas. El calentamiento consistió en una primera etapa de secado de las cápsulas de porcelana que se utilizaron para contener la muestra. Se contabilizó la masa de las mismas una vez llevadas a temperatura ambiente en un desecador. Luego se pesó la masa de la muestra sumado a la de la cápsula de porcelana y se introdujo en la mufla, subiendo la temperatura gradualmente hasta (950 ± 20) °C. Por último, se tomó la masa del material remanente en la cápsula. Para calcular el porcentaje de contenido de materia volátil la norma establece las ecuaciones 1 y 2 que se presentan a continuación. Esta determinación se realizó por triplicado, sin embargo, no se realizó para la muestra de cada ruta, sino que se mezclaron todas las muestras y de ahí se tomó las porciones para realizar este análisis.

Cálculo de materia volátil en la muestra:

$$\text{Porcentaje de masa perdida en la mufla} = 100 \times (W_i - W_f) / (W_i - W_c) = A. \quad (1)$$

Donde:

W_c = Masa de la cápsula de porcelana utilizada

W_i = Masa inicial (g)

W_f = Masa final (g)

$$\text{Porcentaje de materia volátil} = A - B \quad (2)$$

Donde:

A = Porcentaje de masa perdida

B = Porcentaje de humedad según método *ASTM E871*.

Porcentaje de humedad según *ASTM E871*

(Se realiza únicamente para la determinación de materia volátil ya que la fórmula establecida por la norma *ASTM E872-82* así lo requiere.)

Se tomó la muestra de aproximadamente $(10,00 \pm 0,01)$ g de los residuos de jardinería y se colocó en una cápsula de porcelana previamente secada y pesada. Se introdujeron (cápsula

más muestra de residuos de jardinería) en una estufa a una temperatura de $(103 \pm 20)^\circ\text{C}$ por un tiempo de alrededor de 10 horas. Luego se sacaron las cápsulas y se llevaron a temperatura ambiente en un desecador. Se tomaron las masas finales. Esto se realizó por triplicado. Para determinar el porcentaje de humedad se utiliza la ecuación 3 tomada de la norma *ASTM E871* (2013).

$$\text{Porcentaje de humedad en la muestra} = [(W_i - W_f)/(W_i - W_c)] \times 100 \quad (3)$$

Donde:

W_c = Masa de la cápsula de porcelana (g)

W_i = Masa inicial (g)

W_f = Masa final (g)

3.2.2. Modelado del proceso de gasificación

La modelación y simulación del proceso de gasificación fue construida en el programa ASPEN HYSYS V8, un programa computacional desarrollado por Aspen Tech. Se utilizó la licencia de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica. Es un simulador de procesos químicos donde se involucran flujos de materia y energía de una unidad del proceso a otra. Este programa computacional permite definir parámetros, los componentes del sistema, el modelo termodinámico que se ajusta a los componentes y el proceso a modelar, así como las reacciones que se llevan a cabo. Como resultado permite obtener la composición elemental del syngas así como su temperatura y presión. Además es posible acoplar el sistema de generación eléctrica obteniendo el flujo de energía producido.

Para dicho modelado se tomaron varios supuestos:

1. El proceso se lleva a cabo en estado estacionario.
2. La pirólisis se da de forma instantánea dentro del reactor y no se simuló en un reactor individual.
3. Las reacciones de gasificación alcanzan el equilibrio químico.
4. Las reacciones de gasificación consideradas son la presentadas en el cuadro 2.5.
5. Las condiciones de referencia ambiente son $T=25^\circ\text{C}$ y $P=1\text{ atm}$.

Planteamiento del modelo

Se utilizó el modelo termodinámico de ecuación de estado de Peng Robinson (PR) porque, según el manual del usuario de ASPEN HYSYS, permite simular procesos con hidrocarburos. El modelo del gasificador se realizó considerando que los productos gaseosos alcanzan el equilibrio químico ya que dada la alta temperatura de operación del gasificador se alcanza una alta velocidad de reacción. La ecuación de PR es la siguiente

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2 + 2vb - b^2} \quad (4)$$

Donde:

$$b = 0,07780RT/P$$

$$a = 0,45724 \times R^2 \times T^2 \times [1 + f_w(1 - T_r^{0,5})]^2 / P$$

$$f_w = 0,37464 + 1,54226\omega - 0,26992\omega^2.$$

R = Constante universal de los gases ideales.

T= Temperatura.

v= velocidad de reacción.

El diagrama de flujo del proceso se presentan en la figura 3.2.

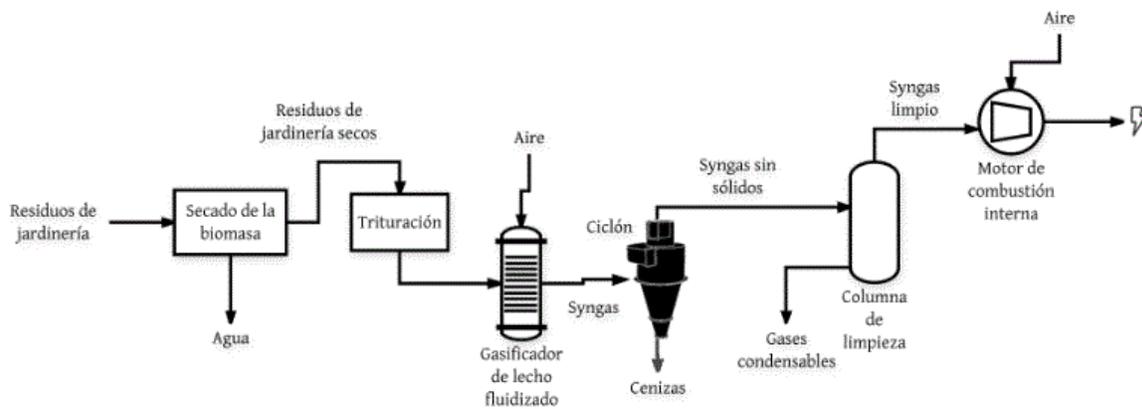


Figura 3.2 Esquema representativo del sistema de gasificación propuesto.

3.3. ANÁLISIS ECONÓMICO

Se seleccionó el gasificador modelo PP20 del proveedor ALL POWER LABS ya que es un sistema completo que tiene acoplado el generador, un sistema de control electrónico y el recirculado de calor remanente. Además, es un proveedor conocido dado que en la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica se cuenta con un gasificador de esta misma casa comercial. Para el pretratamiento físico de la biomasa se seleccionó la trituradora de desechos orgánicos TR500G marca TRAPP. El sistema de secado propuesto a través de una banda de intercambio indirecto de calor fue planteado con la finalidad de aprovechar el calor residual de algunos puntos del proceso de gasificación. Estos sistemas tienen un costo que depende de algunos factores a la hora de instalación y de propiedades específicas del flujo de residuos a trabajar, por lo que los proveedores consultados no pudieron brindar un valor exacto del equipo. Se estimó un costo con base en información del proveedor Latinamerican Paper Machinery, además, se comparó con los datos estimados por Coopedota para un sistema similar.

Se planteó el aprovechamiento de la energía eléctrica producida en la planta gasificadora para consumo de la municipalidad, ubicando la misma en un área propia del municipio. Sin embargo, debido a que no se logró obtener el dato de consumo eléctrico por parte de la municipalidad, se estimó la ganancia por concepto de venta de la electricidad generada con base en las tarifas establecidas por el ICE para compra de electricidad.

También se contempló como entrada o ahorro el dinero invertido mensualmente por la disposición de los residuos de jardinería en el relleno sanitario.

Además de la inversión en equipos, se tomó en cuenta el salario y las cargas sociales de un operador de la planta así como otros costos variables.

Para emitir un criterio de viabilidad se calcularon los indicadores económicos de la tasa interna de retorno y el período de recuperación de la inversión.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. GESTIÓN DE LOS RESIDUOS DE JARDINERÍA DE LA MUNICIPALIDAD DE ESCAZÚ

La gestión integral de los residuos sólidos de jardinería del cantón de Escazú se implementó desde 2011 por el municipio. Como primer esfuerzo, procedieron a la recolección de manera separada de este tipo de residuos orgánicos. Posteriormente, trabajaron en la educación social y la concientización de la población para que ellos colaboraran y dispusieran los residuos de jardinería de manera separada y en los días asignados para tal fin. La finalidad era implementar algún sistema de aprovechamiento de estos residuos, sin embargo, a la fecha, solo se envían al relleno sanitario.

Durante las visitas y realización de las rutas de recolección de estos residuos se pudo observar algunas debilidades en cuanto a este sistema de gestión. Por ejemplo, se tienen rutas deficientes pues se pasa varias veces por la misma calle y no se tiene una sectorización adecuada. Por otra parte, en la diagramación se realizan repetidos giros a la izquierda, lo que genera pérdidas de tiempo y combustible. Además, algunas rutas como la de San Antonio y la que recorre el centro de Escazú son las de mayor tráfico y como todas las rutas se llevan a cabo en la mañana existe mucho tránsito vehicular, lo que genera pérdidas de tiempo y combustible que afectan el rendimiento de la recolección de los residuos.

La siguiente etapa es la disposición en el relleno. Si bien esta manera de proceder es, desde el punto de vista ambiental, mejor que dejar que los residuos se degraden en cualquier sitio generando contaminación en agua y suelo, implica un gasto de ¢10 650 colones por tonelada (es decir, ¢ 2 215 200 mensuales), lo cual podría ahorrarse en un proyecto de aprovechamiento energético de dichos residuos.

Actualmente se recolectan un máximo de 15 bolsas por vivienda o comercio y se observó que algunas viviendas y comercios disponen hasta 20 bolsas o más cada fecha de recolección, por lo que la producción de estos residuos es mayor que la que se tiene contabilizada, dicha situación se ilustra en la figura 4.1. Las bolsas de residuos de jardinería que no son recolectadas se acumulan hasta 15 días, cuando vuelve a pasar el camión y se repite la problemática al sumarse las bolsas de residuos que las personas vuelven a desechar. Estos residuos en esa condición de disposición representan una problemática ambiental por las emisiones y los lixiviados producto de su descomposición, situación que debe ser solucionada tanto por el impacto ambiental que representa como por la pérdida de esos residuos que pueden ser valorizados mediante esta propuesta de proyecto.



Figura 4.1 Ilustración de la cantidad de bolsas de residuos de jardinería dispuestos por una sola vivienda.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE JARDINERÍA

Con la finalidad de caracterizar básicamente los residuos de jardinería de la municipalidad de Escazú se determinó el contenido de humedad, el poder calórico superior y la cantidad de material volátil. Resultados que se muestran en los cuadros 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente. Otras propiedades como el análisis elemental, el contenido de cenizas, la densidad de partícula y otros no se determinaron experimentalmente por disponibilidad de tiempo y equipos, sin embargo, se incluyeron en la sección de revisión bibliográfica.

Cuadro 4.1. Contenido de humedad de los residuos de jardinería de la Municipalidad de Escazú a través de muestreos en cada ruta de recolección.

| Muestra | Contenido de humedad (%) |
|-----------------|---------------------------------|
| Trejos | 37,32 ± 0,4 |
| Zona Franca | 13,80 ± 0,3 |
| Las Vistas | 13,39 ± 0,19 |
| Jaboncillos | 23,38 ± 10,46 |
| Laureles | 29,28 ± 13,35 |
| Guachipelín | 21,02 ± 16,79 |
| San Antonio | 11,80 ± 1,33 |
| Mayorca | 48,67 ± 8,41 |
| Bello Horizonte | 15,35 ± 0,47 |
| Promedio | 23,78 ± 25,15 |
| Rango | 11,80 – 48,67 |

Cuadro 4.2. Poder calórico bruto de los residuos de jardinería del cantón de Escazú determinado a las muestras representativas de cada ruta de recolección.

| Muestra | Valor Calórico Bruto o Superior promedio (kJ/kg) |
|-----------------|---|
| Zona Franca | 16354 ± 883 |
| Jaboncillos | 14277 ± 698 |
| Laureles | 15721 ± 180 |
| Trejos | 16562 ± 362 |
| Bello Horizonte | 15654 ± 796 |
| Las Vistas | 15328 ± 1428 |
| San Antonio | 15631 ± 660 |
| Guachipelín | 14844 ± 1152 |
| Mayorca | 15217 ± 553 |
| Promedio | 15515 ± 2126 |
| Rango | 14277 – 16562 |

Cuadro 4.3. Medición de masas de las muestras para determinación de material volátil.

| Muestra | Cápsula (±0,01) g | Cápsula más muestra (±0,01) g | Cápsula más muestra seca (±0,01) g | Cápsula más material remante (±0,01) g | Porcentaje de material volátil |
|----------------|--------------------------|--------------------------------------|---|---|---------------------------------------|
| Réplica 1 | 80,32 | 90,42 | 88,42 | 82,14 | 57,73 |
| Réplica 2 | 78,02 | 88,10 | 85,77 | 79,86 | 53,14 |
| Réplica 3 | 86,54 | 96,65 | 95,06 | 88,22 | 64,55 |
| Promedio | | | | | 58 ± 9 |



Figura 4.2 Muestras de los residuos de jardinería del cantón de Escazú.

El contenido de humedad es una de las principales características para poder decidir que ruta de aprovechamiento seguir según las presentadas en la figura 2.5. Los residuos de jardinería del cantón de Escazú tienden a variar su contenido de humedad durante el año debido a la presencia de mayor o menor cantidad de lluvia. Los meses más secos son los primeros meses del año, mientras que los más lluviosos van de agosto a noviembre, según el Instituto Meteorológico Nacional. Cabe destacar que los contenidos de humedad presentados en el cuadro 4.1 corresponden al muestreo realizado durante febrero de 2017. Se obtuvo un promedio de 24% de humedad, lo que se considera adecuado para los procesos de transformación termoquímica, ya que la energía requerida para eliminar esa humedad previo al proceso de conversión es relativamente baja. Los valores de humedad tienen una desviación estándar de 12,58 y se debe a la heterogeneidad de las muestras ya que los residuos en su mayoría corresponden a ramas, césped, hojas y otros residuos fibrosos.

Otro parámetro de importancia energética es el poder calórico de un material, el cual define su contenido energético y es un valor de referencia para el diseño de sistemas de combustión de biomasa (Nhuchhen & Abdul Salam, 2012). Los poderes calóricos en el cuadro 4.2 son representativos de la biomasa en estudio y corresponden al poder calórico bruto. Estos valores son considerados aceptables para un aprovechamiento energético ya que se ha establecido 20 500 kJ/ kg como un valor de referencia óptimo y el promedio de los residuos de jardinería en estudio es de 15510 kJ/kg. Además, se tienen poderes calóricos muy similares a los de cultivos energéticos pues García, Pizarro, Lavín, & Bueno (2012) presentan un análisis de poderes calóricos de un promedio de 16820 kJ/kg para este tipo de biomasa.

Adicionalmente, se determinó el contenido de material volátil, el cual es un indicador de la eficiencia de conversión. Los valores de este parámetro presentados en el cuadro 4.3 muestran un porcentaje de material volátil promedio de 58,47 % y este valor corresponde a los vapores condensables y los gases permanentes liberados de la biomasa cuando es calentada. Según Aresta, Dibenedetto, & Dumeignil (2012) el valor reportado de material volátil para residuos de poda es de 76,83% en base seca. Este valor de referencia es casi un 20% mayor que el obtenido para los residuos de jardinería del cantón de Escazú y se puede deber a que los residuos de poda reportados por esos autores son de Alemania y este valor puede verse afectado por el origen y composición de la biomasa. A valores bajos del porcentaje de material volátil se requieren precalentamientos para que el material

combustione. Sin embargo, en comparación con el dato de referencia el valor experimental no es bajo.

4.3. SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE JARDINERÍA

4.3.1. Selección de la tecnología de aprovechamiento

La gasificación como tecnología para la conversión de los residuos orgánicos del cantón de Escazú fue seleccionada con base en los criterios de comparación presentados en el cuadro 2.4. Los residuos de jardinería presentan un porcentaje de humedad promedio de (24 ± 25) , lo cual es un primer criterio para orientarse hacia transformaciones termoquímicas. Además, la naturaleza lignocelulósica de los residuos de jardinería limita el rendimiento de la degradación anaerobia de los mismos ya que se requieren pretratamientos costosos.

Además, la gasificación es más permisible en cuanto al factor de humedad en comparación con la incineración y la pirólisis, lo que es deseable, ya que tal y como se mencionó en el marco teórico, la humedad es un factor variable dependiendo de las condiciones del estado del tiempo de la zona. De igual forma, según el ingeniero Bjorn Utgard (comunicación personal, Abril 3, 2017), especialista en el desarrollo de energías limpias, para este tipo de residuos en particular, se obtiene mejor rendimiento económico y energético con la gasificación ya que se obtiene mayor cantidad de energía por unidad de biomasa que en la combustión directa.

4.3.2. Pretratamiento de la biomasa

Como se mencionó previamente los residuos de jardinería (biomasa) deben tener un tamaño de partícula adecuado al tipo de gasificador y a la tecnología seleccionada.

Se ha establecido que los gasificadores de lecho fluidizado requieren tamaños de biomasa entre 10-20 mm (Basu, 2010). Sin embargo, considerando los requerimientos del gasificador comercial seleccionado, el cual indica un tamaño de biomasa entre 12-40 mm, se seleccionó un tamaño de 12 mm para la biomasa que entra al gasificador y así se toman en cuenta ambos criterios.

Para este pretratamiento físico se ha seleccionado la trituradora de residuos orgánicos marca TRAPP modelo TR500 que se puede observar en la figura 4.3



Figura 4.3 Trituradora de residuos orgánicos. Tomado de (GERMAN-TEC, 2017)

Este equipo permite triturar arbustos, ramas, hierbas, troncos y maderas suaves. Tiene 2 tolvas de alimentación y de acuerdo con el proveedor, este equipo permite triturar hasta el tamaño deseado.

4.3.3. Equipo gasificador

Se seleccionó el gasificador modelo Power Pallet PP20 de la casa comercial ALL POWER LABS. Es un equipo que trae integrado el sistema de generación eléctrica, es de fácil instalación y operación. Es un equipo prácticamente automatizado y que establece un consumo de 1,2 kg de biomasa para producir 1 kWh. Este equipo se ilustra en la figura 4.4



Figura 4.4 Configuración básica del gasificador PP20. Tomado de (All Power Labs, 2017)

El manual del equipo describe las condiciones que debe presentar la biomasa en la alimentación, tal y como se observa en el cuadro 4.4, en donde se corrobora que el tamaño de residuos de jardinería y el contenido de humedad en la alimentación al sistema se adecúa a los requerimientos del equipo.

Cuadro 4.4 Requerimientos de la biomasa de alimentación al gasificador PP20. Tomado de (All Power Labs, 2017)

| Biomasa de alimentación | |
|--------------------------------|----------|
| Tamaño | 12-40 mm |
| Contenido de humedad | 5 -30 % |

Por otra parte, este equipo especifica que se puede obtener una potencia continua máxima de 18kWh que se obtiene al alimentar 20 kg/h, de acuerdo con el rendimiento especificado en la ficha técnica del equipo.

Este equipo se debe traer desde California y todos los gastos de instalación, entrenamiento del operador y otros han sido considerados en su cotización. Debe mantenerse en un lugar ventilado y protegido de la lluvia y de la exposición directa al sol.

Como referencia de la casa comercial y de la calidad de este equipo se consultó a la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en la cual se tiene un gasificador de este mismo proveedor y que según el personal de esta escuela presenta un buen funcionamiento.

4.3.4. Selección del agente gasificante

En la sección de revisión bibliográfica se presentó la variación de la composición del syngas de acuerdo con el agente gasificante utilizado. Para una gasificación con aire se obtiene predominancia del monóxido de carbono y del metano sobre el hidrógeno, teniendo un syngas de bajo poder calorífico que es utilizable en el motor de combustión interna para la generación eléctrica. Otra ventaja es que este agente gasificante es un recurso que no tiene valor económico y su utilización no implica un mayor gasto energético.

4.3.5. Determinación de la relación de equivalencia

La relación de equivalencia (ER) fue determinada con base en los criterios de los autores Rodríguez et al. (2010) y (Luque et al. (2016), quienes afirman que el valor de dicho parámetro debe estar comprendido entre 0,2-0,4. Esto se presenta ya que se debe asegurar que el combustible (residuos de jardinería) sea gasificado y no sufra una combustión directa. Según estos autores, una relación de equivalencia menor a 0,2 provoca una excesiva formación de coque mientras que una relación muy alta (mayor a 0,4) resultaría en una excesiva formación de productos de combustión completa (CO_2 y H_2O) sacrificando los productos deseables los cuales son CO y H_2 . Por esto, se seleccionó el valor de 0,2 que es un valor normal con el que se obtiene un 65% de eficiencia de conversión del carbono. (Basu, 2010). El flujo de aire fue calculado con base en la relación equivalente cuya definición se presenta en la ecuación 4.

$$ER = \frac{(R_{A/C})_r}{(R_{A/C})_s} \quad (4)$$

Donde, $(R_{A/C})_r$ es la relación aire-combustible real, y $(R_{A/C})_s$ es la relación aire-combustible estequiométrica, la cual según Rodríguez et al. (2010) se calcula según lo presentado en la ecuación 5.

$$(R_{A/C})_s = 8,89(C + 0,375 \times S) + 26,5 \times H - 3,3 \times O \quad (5)$$

Valor que se estimó utilizando los datos del análisis elemental de la biomasa presentado en el cuadro 2.2. Se obtuvo un flujo de aire de 16 kg/h por cada 20 kg/h de biomasa, tal y como se muestra en el cuadro 4.6. Dada la explicación anterior se puede denotar la importancia e influencia en la composición del syngas, tanto del tipo de agente gasificante como de la relación entre el agente gasificante y la biomasa en el rendimiento del syngas.

4.3.6. Diseño del sistema de gasificación mediante la simulación del proceso en un programa computacional.

Se desarrolló la simulación del proceso planteado en el programa computacional ASPEN HYSYS. El modelo termodinámico de la ecuación de estado de Peng Robinson es un modelo que permite realizar simulaciones de procesos que contienen sustancias orgánicas con base en hidrocarburos, lo que incrementa su aplicabilidad en sistemas no reales. Además, tal modelo posee bajos errores al estimar propiedades que incluyen mezclas. La selección de este modelo se realiza para que el programa computacional tome en cuenta las propiedades termodinámicas en todo el proceso de simulación, permitiendo obtener resultados confiables que luego son optimizados para cada componente del proceso por medio de un análisis de sensibilidad de variables. (Durango, 2015).

El sistema completo de gasificación diseñado en el programa computacional ASPEN HYSYS se puede observar en la figura 4.5

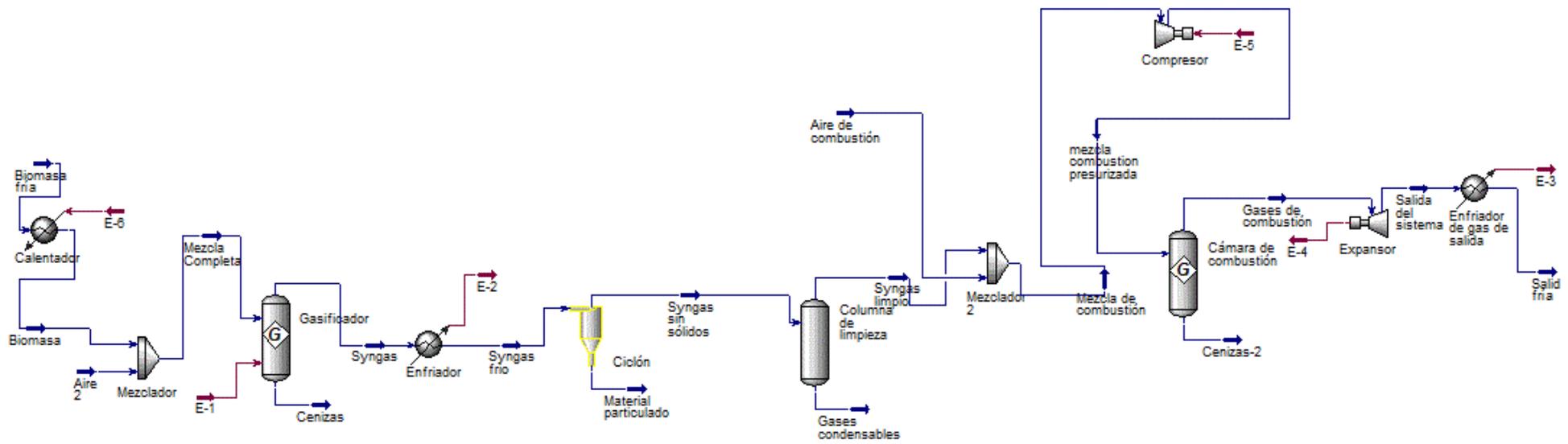


Figura 4.5 Esquema representativo del sistema de gasificación en ASPEN HYSYS.

Las unidades del sistema fueron definidas con base en la revisión bibliográfica para gasificadores de lecho fluidizado.

Se plantea un sistema de secado de la biomasa mediante intercambio de calor con una corriente de vapor o aire caliente a través de una banda. Tal corriente de vapor es residual del sistema de gasificación, para llevar los residuos a un 10% de humedad que es el requerimiento de alimentación. Este tipo de sistema no presenta contacto directo entre la biomasa y el aire o vapor. El secado y la trituración forman parte del pretratamiento requerido para acondicionar la biomasa antes de alimentarla al sistema. Posteriormente, en el gasificador, es donde se llevan a cabo todos los procesos de descomposición térmica de la biomasa representados en las reacciones del cuadro 2.5.

La limpieza del gas producido se lleva a cabo en el ciclón y en la columna. En el primero se eliminan las cenizas y cualquier material particulado que venga arrastrado por la corriente del gas, mientras que en la segunda se eliminan gases condensables, como vapor de agua y otros para que no perjudiquen el funcionamiento del motor en la etapa de generación eléctrica. Esta última etapa corresponde al motor de combustión interna, en la cual, los gases producto de la combustión del syngas comprimido con aire, empujan el pistón desplazándolo en el interior del cilindro y a su vez haciendo girar el cigüeñal, siendo ese movimiento rotativo transmitido al generador para así obtener la electricidad.

Este tipo de plantas de generación reciben el nombre de sistemas de gasificación de biomasa integrada, pues es la generación conjunta de calor y energía eléctrica.

En la revisión bibliográfica se expusieron casos de este tipo de sistemas en el país, como lo es el ICAFE, lo que demuestra que esta tecnología ya está en curso en el país y aunque los residuos que se han trabajado no son de la misma naturaleza que los que plantea este proyecto es posible desarrollarla ya que, la gasificación es una tecnología de aplicación amplia a diferentes tipos de biomasa, en el tanto se presente una adecuada selección del tipo de gasificador.

La composición de la biomasa de alimentación se presenta en el cuadro 4.5

Cuadro 4.5 Composición elemental de la biomasa de alimentación al sistema. Adaptado de (Huerta, 2012)

| Componente | Fracción másica |
|------------|-----------------|
| Carbono | 0,4134 |
| Nitrógeno | 0,0312 |
| Hidrógeno | 0,0550 |
| Oxígeno | 0,3483 |
| Azufre | 0,0027 |
| Cenizas | 0,0578 |
| Agua | 0,0978 |

Las condiciones de operación consideradas en cada unidad del proceso simulado se presentan en el cuadro 4.6, las restantes fueron calculadas por el programa computacional y corresponden a las temperaturas de cada unidad del proceso y la composición del gas posterior a la gasificación y a la combustión.

Cuadro 4.6 Parámetros alimentados a la simulación para la corrida de gasificación.

| Unidad | Propiedades y/o valores asignados | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|-------|----------|
| | Propiedad | Valor | Unidades |
| Flujo de Biomasa seca | Flujo másico | 20 | kg/h |
| | Temperatura | 110 | °C |
| | Presión | 101,3 | kPa |
| | Humedad | 10 | % |
| Aire | Flujo másico | 18 | kg/h |
| | Temperatura | 25 | °C |
| | Humedad | 1,71 | % |
| Gasificador | Delta P | 0 | kPa |
| | Temperatura | 800 | °C |
| Syngas | Temperatura | 800 | °C |
| | Flujo másico | 55,19 | kg/h |
| Aire de combustión | Flujo másico | 120 | kg/h |
| | Temperatura | 25 | °C |
| | Contenido de humedad | 1,71 | % |
| Compresor | Eficiencia adiabática | 75 | % |
| | Delta P | 911,9 | kPa |
| Expansor | Eficiencia adiabática | 75 | % |
| | Delta P | 911 | kPa |

En el esquema de la simulación de la figura 4.5 es posible visualizar las partes del proceso simuladas, sin embargo, es válido destacar que la devolatilización de los sólidos (pirólisis instantánea) no se simula, se asume, ya que el programa no posee un reactor específico para simular el craqueo o fragmentación de las moléculas complejas en moléculas más simples, y obtener la corriente de entrada al gasificador con la composición elemental de la biomasa que fue presentada en el cuadro 4.5.

La configuración del programa computacional ASPEN HYSYS para realizar la simulación incluye inicialmente la selección de los componentes involucrados en las reacciones, posteriormente el modelo termodinámico, y después los conjuntos de reacciones. Se debe destacar que se cargaron dos conjuntos de reacciones, el primero con las reacciones de gasificación, y el segundo con las reacciones de combustión de los gases que componen el syngas. Las reacciones de combustión consideradas se muestran en el cuadro 4.7.

Cuadro 4.7 Reacciones de combustión del syngas. Adaptado de Basu (2010)

| Tipo de reacción | Reacción |
|------------------------------------|--|
| Combustión del hidrógeno | $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ |
| Combustión del monóxido de carbono | $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ |
| Combustión del metano | $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ |
| Combustión del nitrógeno | $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$ |

Posterior a la configuración de las reacciones, se llevó a cabo la modelación del proceso de gasificación considerando inicialmente, que los residuos de jardinería presentan un 10% de humedad (que se alcanza con un previo secado), y la composición indicada en el cuadro 4.5; además se estableció un tamaño de partícula de 12 mm, con base en la revisión bibliográfica. Esta corriente se mezcla con el aire de gasificación, en una relación de equivalencia (ER) de 0,2 para ingresar al gasificador, cuya línea de salida corresponde al gas producto de la gasificación (syngas) y que tiene una composición que obedece a las condiciones de temperatura y de las reacciones llevadas a cabo en el gasificador, el cual es un reactor de Gibbs que a la vez determina esa composición minimizando la energía libre de Gibbs del proceso de gasificación (estado de equilibrio). (Nikoo & Mahinpey, 2008). Este tipo de reactor se puede utilizar cuando se desconoce la cinética de la reacción y se conocen variables como la temperatura y presión, por lo que se adapta a este caso de aplicación ya que al ser este proyecto un primer planteamiento de la gasificación de residuos de jardinería, se desconocen las variables de la cinética de las reacciones de gasificación para este tipo de biomasa. El balance de masas del gasificador puede observarse en la figura 4.6

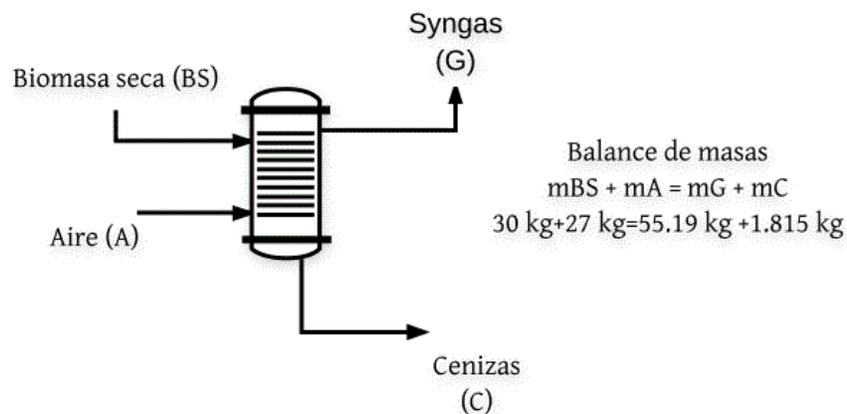


Figura 4.6 Balance de masas de la unidad de gasificación.

Este balance de masas es con base en una hora de flujo. La m representa la masa de cada componente. Se puede observar como la mayor cantidad de masa en la salida corresponde al syngas. Las cenizas están compuestas por óxidos de calcio, silicio, entre otros. (Basu, 2010)

Sin embargo estos compuestos como tales, no se encuentran en la base de datos del programa computacional. Dada esta limitación se seleccionó dentro de la lista de sólidos el calcio y es lo que compone ese flujo denominado “cenizas”.

Posteriormente, el producto de gasificación es pasado a través de un ciclón para separar la fase gaseosa (syngas) del componente sólido denominado “char” y así obtener el producto de interés, identificado como “syngas sin sólidos” en la figura 4.5 y que es la corriente que entra en el proceso de combustión para la generación eléctrica.

La influencia de la temperatura puede verse en el rendimiento del metano ya que la concentración de este disminuye al aumentar la temperatura y se ve favorecida con la gasificación a alta presión, según los resultados presentado por Rodríguez et al., (2010).

Se seleccionó una temperatura de operación del reactor de 800 °C a la cual se obtiene un buen rendimiento de hidrógeno y monóxido de carbono. Esta temperatura se ha registrado como adecuada para la gasificación de biomasa y de operación de sistemas de lecho fluidizado (Basu, 2010).

La composición del gas de síntesis obtenido en la simulación se observa en el cuadro 4.8.

Cuadro 4.8 Composición del syngas proveniente del gasificador.

| | Mole Fractions | Vapour |
|-----------|----------------|--------|
| Methane | 0.0026 | |
| Oxygen | 0.0000 | |
| Calcium | 0.0000 | |
| S_Rhombic | 0.0000 | |
| H2O | 0.0293 | |
| Hydrogen | 0.3208 | |
| NO | 0.0000 | |
| Nitrogen | 0.2779 | |
| CO | 0.3361 | |
| CO2 | 0.0332 | |
| Carbon | 0.0000 | |
| Total | 1.00000 | |

En la información de la corriente syngas mostrada en el cuadro 4.8 se puede confirmar la composición del syngas para la biomasa en estudio, el cual está principalmente conformado por CO, seguido de H₂ y N₂. Esta composición no se puede comparar con la gasificación de otros tipos de biomásas pues cada una tiene una composición elemental distinta que influye en la composición de este producto de interés.

Como etapa final en la simulación, este syngas, posterior a las etapas de limpieza, ingresa a la cámara de combustión (que asemeja lo ocurrido en el motor) junto con el aire, esta vez en exceso, un flujo de 120 kg/h, para que ocurran las reacciones presentadas en el cuadro 4.7.

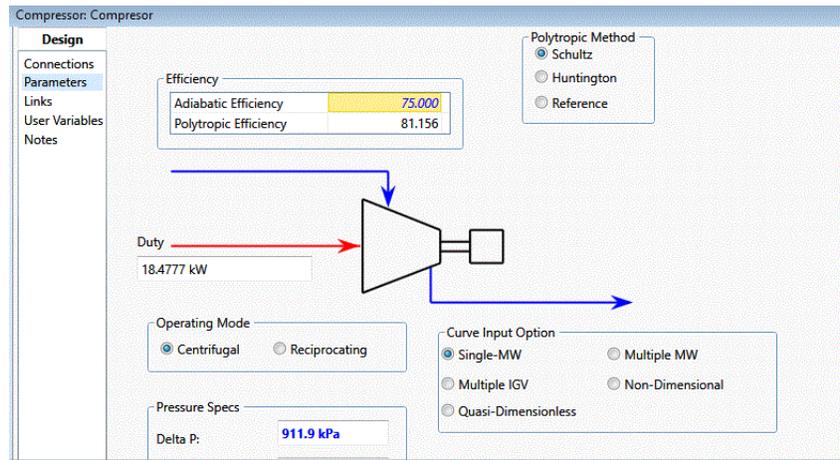
La determinación de este aire en exceso se llevó a cabo mediante iteraciones del programa computacional hasta obtener un porcentaje volumétrico de monóxido de carbono menor a 0,5, ya que es lo establecido por el Reglamento para el Control de las Emisiones Contaminantes Producidas por los Vehículos Automotores con Motor de Combustión Interna. Este reglamento tiene una sección con los límites permitidos para la emisión de monóxido de carbono de motores que funcionan con gas natural u otro alternativo. Además, se obtiene un 1,8% de oxígeno en los gases de combustión lo que permite asegurar un exceso de aire para la combustión completa del syngas y así obtener un mayor rendimiento energético. La composición volumétrica de los gases de combustión se muestra en el cuadro 4.9

Cuadro 4.9 Fracciones volumétricas del gas de combustión.

| | LiqVol Fractions | Vapc |
|-----------|------------------|------|
| Methane | 0.0000 | |
| Oxygen | 0.0183 | |
| Calcium | 0.0000 | |
| S_Rhombic | 0.0000 | |
| H2O | 0.0704 | |
| Hydrogen | 0.0003 | |
| NO | 0.0469 | |
| Nitrogen | 0.6788 | |
| CO | 0.0014 | |
| Total | 1.00000 | |

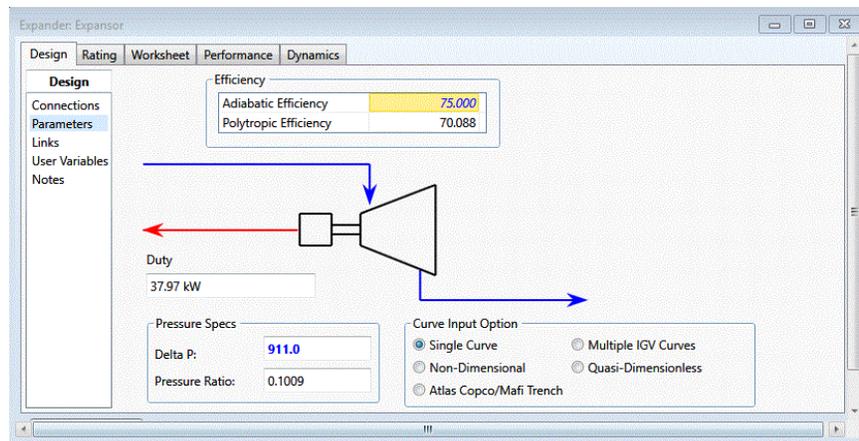
Es necesario comprimir la mezcla del aire y del syngas previo a la entrada del reactor de combustión para que se encienda el motor. El consumo energético de ese compresor se denota en el cuadro 4.10.

Cuadro 4.10 Descripciones del compresor de aire para combustión.



La corriente de salida de la cámara de combustión es sometida a un proceso de descompresión de donde se obtiene la energía de generación del proceso. Esta descripción se denota en el cuadro 4.11

Cuadro 4.11 Descripciones de la unidad de expansión posterior a la cámara de combustión.



La descripción presentada anteriormente muestra una potencia de 37,97 kW, a la cual se le debe reducir los 18 kW de consumo del compresor para obtener una potencia neta de 20 kW. Esta generación se obtiene por cada 20 kg/h de hora de alimentación.

Se puede comparar estos datos con el gasificador de lecho fluidizado de la Escuela de Ingeniería Forestal el cual por cada 9 kg/h de alimentación produce 6.3 kW de potencia real (M. Chaves, comunicación personal, junio 20, 2017). Por otra parte, considerando el rendimiento teórico del gasificador seleccionado, se estima que el sistema propuesto debería

generar 17 kW de potencia por lo que se valida la simulación del sistema de gasificación propuesto.

Se han desarrollado varias investigaciones en cuanto a simulaciones de este tipo en donde se utiliza el programa computacional Aspen Plus, el cual tiene una diversidad mayor en cuanto a reactores. Lo que cabe destacar de autores como Nikoo & Mahinpey (2008) y Nayak & Mewada (2011) es que presentan esquemas de la simulación para gasificadores de lecho fluidizado con una secuencia similar al desarrollado en este trabajo, lo que permite comparar parámetros de alimentación del sistema y presiones de operación. Por otra parte, Durango (2015) desarrolló un modelo de simulación para gasificación de cascarilla de arroz en Bogotá, utilizando ASPEN HYSYS. Comparando el esquema de la figura 4.5 con el presentado por este autor (ver anexo 4) se puede validar la selección de los reactores de Gibbs, las temperaturas de las corrientes y las unidades del proceso, además de que el autor también introduce la biomasa con la composición elemental de la misma y no como un sólido con una fórmula molecular definida.

4.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

Se calculó la inversión inicial del proyecto tomando en cuenta el costo de los equipos descritos anteriormente. El costo del gasificador incluye un kit de mantenimiento y partes requeridas para su instalación y así como el costo del técnico para instalar el equipo y capacitar al operario para el uso del mismo. Se consideró un 10% sobre el precio del gasificador para los costos de envío, impuestos y otros gastos de nacionalización del equipo, los cuales fueron estimados por el proveedor. Además, existe un costo de instalación que considera los requerimientos del gasificador para su instalación, modificaciones del área y la altura del techo, pues este equipo requiere al menos una altura de 3,70 m desde el suelo, este valor fue estimado en un 30%, de acuerdo a criterios de expertos, ya que es un porcentaje comúnmente utilizado en la industria. Se tomaron en cuenta los costos del equipo de secado en banda y el triturador. En el cuadro 4.12 se puede observar los aspectos considerados en la inversión inicial.

Cuadro 4.12 Desglose de la inversión inicial del proyecto.

| Aspecto | Costo (¢) |
|---|-------------------|
| Gasificador Power pallet PP20 | 30 462 912 |
| Trituradora TR500 | 2 995 200 |
| Equipo de secado | 10 499 328 |
| Impuestos y costos de nacionalización del gasificador | 4 395 456 |
| Instalación | 5 788 224 |
| Total | 54 141 120 |

Para la operación de la planta de gasificación se considera un único operario que labore 8 horas diarias durante 6 días a la semana. Se fijan 6,5 horas de producción o de funcionamiento del gasificador al día considerando 2,5 horas del período punta y 4 horas del período valle según lo establecido por el ICE. Las restantes 1,5 horas de la jornada se destinan a

preparación de la materia prima y mantenimientos del equipo. Los precios mensuales de energía y potencia utilizados para el cálculo de las ganancias por concepto de venta de electricidad fueron tomados de la Gaceta N°120 (ver anexo 3).

Como se mencionó en la sección anterior la potencia generada por el sistema es de 20 kW con base en un flujo de alimentación de 20 kg/h (base seca), considerando las 6,5 horas de operación se tiene un consumo diario de 130 kg de biomasa seca, para un total de 3120 kg mensuales. Y, tomando en cuenta el porcentaje de humedad se tiene un consumo de 4000 kg de residuos de jardinería por mes, esto por las horas de producción y el flujo de alimentación definidos. Con base en este flujo de alimentación y una jornada de 6 días semanales se tiene una producción de 3120 kWh/mes.

En cuanto al ahorro por disposición en el relleno se consideró un 75% del total debido a que no se está considerando el tratamiento del 100% de los desechos generados. El flujo de caja del proyecto, en dólares, se presenta en el cuadro 4.13. Se fijó un horizonte de 10 años para la estimación de la depreciación. Se debe resaltar que existe un ahorro por el costo de kilometraje de transporte de los residuos desde el cantón hasta el Parque de Tecnología Ambiental Uruka y que no se tomó en cuenta porque la Municipalidad no facilitó los datos sobre el costo de dicha actividad.

Cuadro 4.13 Análisis de flujo de caja para el proyecto de gasificación de residuos de jardinería.

| <u>Análisis de flujo de caja</u> | 2017 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | TOTAL |
|---|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Saldos | | | | | | | | | | | | | |
| Capital invertido | 93 995 | | | | | | | | | | | | |
| Costo total del equipo | <u>93 995</u> | | | | | | | | | | | | |
| Costos operativos | | | | | | | | | | | | | |
| Gasto de depreciación (10 años de vida. Iniciando 1/2018) | | 0 | -9 400 | -9 400 | -9 400 | -9 400 | -9 400 | -9 400 | -9 400 | -9 400 | -9 400 | -9 400 | -93 995 |
| Operario | | | -12 144 | -12 144 | -12 144 | -12 144 | -12 144 | -12 144 | -12 144 | -12 144 | -12 144 | -12 144 | -121 440 |
| Costos de operación, imprevistos, mantenimiento. | | | -2 644 | -2 644 | -2 644 | -2 644 | -2 644 | -2 644 | -2 644 | -2 644 | -2 644 | -2 644 | -26 444 |
| Impuestos | | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Costos operativos totales | | <u>0</u> | <u>-24 188</u> | <u>-241 879</u> |
| Entradas | | | | | | | | | | | | | |
| Venta de electricidad | | 0 | 5 448 | 5 448 | 5 448 | 5 448 | 5 448 | 5 448 | 5 448 | 5 448 | 5 448 | 5 448 | 54 480 |
| Disposición de residuos en el relleno | | 0 | 35 568 | 35 568 | 35 568 | 35 568 | 35 568 | 35 568 | 35 568 | 35 568 | 35 568 | 35 568 | 355 680 |
| Entradas totales | | <u>0</u> | <u>0</u> | <u>16 828</u> | <u>168 282</u> |
| + Depreciación | | 0 | 9 400 | 9 400 | 9 400 | 9 400 | 9 400 | 9 400 | 9 400 | 9 400 | 9 400 | 9 400 | 93 995 |
| Flujo de efectivo después de impuestos | | <u>-93 995</u> | <u>0</u> | <u>26 228</u> | <u>168 282</u> |
| Acumulación de efectivo | | <u>-93 995</u> | <u>-93 995</u> | <u>-67 767</u> | <u>-41 540</u> | <u>-15 312</u> | <u>10 916</u> | <u>37 143</u> | <u>63 371</u> | <u>89 599</u> | <u>115 826</u> | <u>142 054</u> | <u>168 282</u> |

Cuadro 4.14 Indicadores económicos.

| Indicador económico | Valor |
|--|--------------|
| VAN (\$) | 98 884 |
| TIR (%) | 8, 88 |
| Tasa de descuento (%) | 5,00 |
| Periodo de recuperación de la inversión (años) | 5,6 |

La inversión total del proyecto es de ¢ 54 141 120, se esperan ingresos anuales de ¢9 676 100, con esos ahorros anuales proyectados la inversión se recupera en 5,6 años. El valor actual neto del flujo de efectivo y de la inversión inicial es de ¢ 56 858 300, como se muestra en el cuadro 4.14.

La tasa interna de retorno del proyecto (TIR) tiene que ser superior a la tasa de interés (tasa de descuento) que se pueda ganar por colocar el dinero (cantidad equivalente a la inversión inicial) en un banco, para este caso se tomó una tasa de descuento del 5%, obteniéndose un TIR de 8,88 %. Tomando en cuenta estos indicadores y considerando el periodo de recuperación de 5 años se afirma que el proyecto tiene viabilidad económica.

Adicionalmente y como un último indicador con base en los cálculos realizados se estima el costo de la electricidad a partir de residuos de jardinería en ¢ 86,25/kWh.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La recolección de residuos de jardinería de la Municipalidad de Escazú tiene deficiencias en cuanto a la sectorización y diagramación de las rutas, lo cual genera pérdidas de tiempo y de dinero.

La cantidad de residuos de jardinería recolectados ha aumentado desde el 2011 hasta la fecha sin embargo, los valores contabilizados no son representativos de la generación en todo el cantón. Estos residuos tienen un porcentaje de humedad promedio de (24 ± 25) y un poder calorífico superior de (15515 ± 2126) kJ/kg

La gasificación es un tratamiento térmico de la biomasa que permite obtener excelentes rendimientos para residuos lignocelulósicos tales como residuos de jardinería. Las plantas de gasificación de biomasa con integración de generación de electricidad presentan mayor rendimiento energético que los procesos de combustión directa de la biomasa. Para el diseño de este tipo de plantas se debe tomar en cuenta el pretratamiento de la biomasa, los equipos requeridos, el lugar y las condiciones de instalación, los periodos de operación y generación de electricidad así como el fin de utilización de la energía.

La composición del syngas está determinada por el tipo de agente gasificante y la relación de este con la cantidad de biomasa así como por la composición elemental de la biomasa que se utilice.

Se obtuvo una potencia de generación de 20 kW por cada 20 kg/h de alimentación.

En la valoración económica del proyecto se tomó en cuenta la inversión requerida en equipos e instalación de los mismos, pretratamientos y operación del sistema mientras que se tomaron como ahorros el costo por disposición en el relleno y como ventas o ganancias, la energía producida (kWh/mes). Con base en esta, se estimó el costo de la electricidad a partir de residuos de jardinería en $\text{¢ } 86,25/\text{kWh}$, el periodo de recuperación de la inversión en 5,6 años, una TIR de 8,88% y una tasa de descuento del 5%. Por lo que el proyecto es económicamente viable.

La importancia de implementar sistemas de cogeneración con biomasa radica en la reducción de costos dado un menor consumo específico de combustible, un menor impacto medioambiental asociado a la neutralidad en el flujo de carbono de la biomasa comparada con el uso de combustibles no renovables (provenientes del petróleo).

5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda caracterizar los residuos en la época lluviosa del año con la finalidad de mejorar la representatividad del valor del contenido de humedad.

Se sugiere hacer un rediseño de las rutas de recolección tomando en cuenta la sectorización, las horas de mayor tránsito y la diagramación para optimizar este proceso.

Los residuos de jardinería tienen poca o nula presencia de lignina y dado que este compuesto es el que aporta la rigidez de la estructura en la biomasa y permite la densificación (a través de pellets, por ejemplo) se deben realizar otros pretratamientos como trituración hasta tamaños requeridos por el tipo de tecnología seleccionada, que permitan la descomposición de los residuos.

Se recomienda comparar los resultados de la simulación energética del proceso de gasificación contra datos experimentales obtenidos al gasificar los residuos de jardinería en un sistema real a escala de laboratorio para así, validar el ajuste del modelo termodinámico y las condiciones de simulación con el proceso real .

Se recomienda aumentar la capacidad de recolección de los residuos de jardinería y así plantear una planta de generación de electricidad de mayor capacidad.

Se puede estimar un ahorro adicional por concepto de kilometraje de traslado de los residuos desde el cantón hasta el relleno sanitario.

Para aumentar la cantidad de energía producida y consumir el 100% de los residuos generados, es conveniente analizar la ampliación de los horarios de operación del equipo así como aumentar el flujo de alimentación en un gasificador de mayor capacidad.

6. REFERENCIAS

- Agrowaste. & Centro Tecnológico Nacional de la conserva y alimentación., A. (s. f.). *Gasificación*.
- Anderson, E., Addy, M., Ma, H., Chen, P., & Ruan, R. (2016). Economic screening of renewable energy technologies: Incineration, anaerobic digestion, and biodiesel as applied to waste water scum. *Bioresource Technology*, 222, 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.076>
- Aresta, M., Dibenedetto, A., & Dumeignil, F. (2012). *Biorefinery - From Biomass to Chemicals and Fuels*. Bari, Italia: De Gruyter. Recuperado a partir de <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBFBCF001/biorefinery-from-biomass/biorefinery-from-biomass>
- Arteaga, L., Flores, M., Escobar, M., Segura, C., & Gordon, A. (2015). *Análisis comparativo de la torrefacción húmeda y seca de Pinos radiada energética*. Medellín, Colombia. Recuperado a partir de http://revistas.unal.edu.co/index.php/energetica/article/view/49764/html_n46a01V5
- ASTM International. (s. f.). ASTM D2015-96 Standard Test Method for Gross Caloric Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. ASTM International.
- ASTM International. (2013a). ASTM E871-82 Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International.
- ASTM International. (2013b). E872-82 Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis - Practical Design and Theory*. Estados Unidos: Elsevier. Recuperado a partir de <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBGPPDT0B/biomass-gasification/biomass-gasification>
- Campuzano, R., & González-Martínez, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste Management*, 54, 3-12. <https://doi.org//dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.016>
- Censos., I. N. de E. y. (2015). Población total proyectada por grupos de edades según provincia y cantón.
- Colmenares, W., & Santos, K. (2008). Generación y manejo de gases en sitios de disposición final. *IngenieriaQuimica.org*, 1-33. Recuperado a partir de <http://www.ingenieriaquimica.org/system/files/relleno-sanitario.pdf>

- Contraloría General de la República. (2016). *Auditoría Operativa de Recolección de Residuos Ordinarios*. San José, Costa Rica.
- Coto, O. (2013). *Evaluación de la Generación de Residuos Agrícolas Orgánicos (RAO) en Costa Rica e Identificación de Sector Prioritario*. San José, Costa Rica.
- de Lasa, H., Salaiques, E., Mazumder, J., & Lucky, R. (2011). Catalytic steam gasification of biomass: catalysts, thermodynamics and kinetics. *Chemical reviews*, *111*(9), 5404. Recuperado a partir de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21650215>
- Durango, J. (2015). *ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DE GASIFICACIÓN INTEGRADA A MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA, EMPLEANDO CASCARILLA DE ARROZ EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA*. Universidad Libre.
- energy, U. S. D. of. (2015). Lower and higher heating values of fuels. Recuperado a partir de <http://hydrogen.pnl.gov/tools/lower-and-higher-heating-values-fuels>
- Escazú, M. de. (2015). Reglamento municipal para la gestión integral de residuos sólidos en el cantón de Escazú.
- Flores, D. (2014). *Potencial metanogénico de residuos lignocelulósicos específicos disponibles en las fincas agrícolas costarricenses para cogeneración*.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource technology*, *103*(1), 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>
- García, S. (2013). *Centrales Termoeléctricas de la Biomasa*.
- Gracia, C., Velázquez-Martí, B., & Estornell, J. (2014). An application of the vehicle routing problem to biomass transportation. *Biosystems Engineering*, *124*, 40-52. <https://doi.org/2075/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.009>
- Huerta, N. (2012). *Degradación anaerobia de residuos de restaurantes de ciudad universitaria*. México.
- IRENA. (2012). Renewable energy technologies: cost analysis series. *International Renewable Energy Agency (IRENA)*. Recuperado a partir de <http://energieclimat.hypotheses.org/9849>
- Jimenez, S. (2013). Evaluación de los impactos ambientales generados por sitios de disposición final de residuos en Costa Rica. Recuperado a partir de <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/centro-de-informacion/material-publicado/articulos?id=617>
- Kumar, A., Jones, D., & Hanna, M. (2009). Energies. *Architectural design*, *2*, 557-573. <https://doi.org/10.3390/en20300556>

- LABS, A. P. (2017). Los 5 procesos de la gasificación.
- Luque, R., Ki Lin, C. S., Wilson, K., & Clark, J. (2016a). *Handbook of Biofuels Production - Processes and Technologies* (Segunda). Reino Unido: Elsevier. Recuperado a partir de <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHBPPTE01/handbook-biofuels-production/handbook-biofuels-production>
- Luque, R., Ki Lin, C. S., Wilson, K., & Clark, J. (2016b). *Handbook of Biofuels Production - Processes and Technologies* (2nd Edition). Elsevier. Recuperado a partir de <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHBPPTE01/handbook-biofuels-production/handbook-biofuels-production>
- Mata, E. V. (2014). Competitividad local y generación de residuos sólidos en Costa Rica. *Recursos de Conocimiento para la gestión municipal.*, 1(1), 1-3. Recuperado a partir de http://municipal.cegesti.org/articulos/articulo_01_100914.pdf
- Mejía, D. (2004). *Propuesta de un plan de recolección de desechos sólidos y aseo urbano en el municipio de Esquipulas Chiquimula*. Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), Guatemala.
- Melissari, B. (2012). Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, 10, 69-82.
- Molino, A., Chianese, S., & Musmarra, D. (2016). Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, 25(1), 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>
- Nacional, I. M. (2017). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. San José, Costa Rica.
- Nayak, R., & Mewada, R. (2011). Simulation of Coal Gasification Process using ASPEN PLUS. *International conference of current trends in technology*, 8-10. Recuperado a partir de http://nuicone.org/site/common/proceedings/Chemical/oral/CH_18.pdf
- Nhuchhen, D. R., & Abdul Salam, P. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel*, 99, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.015>
- Nikoo, M. B., & Mahinpey, N. (2008). Simulation of biomass gasification in fluidized bed reactor using ASPEN PLUS. *Biomass and Bioenergy*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.02.020>
- Pandey, A., Bhaskar, T., Stöcker, M., & Sukumaran, R. K. (2015). *Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. Recuperado a partir de [https://app.knovel.com/web/view/pdf/show.v/rcid:kpRATCB001/cid:kt00UR3FD8/viewerType:pdf/root_slug:recent-advances-in-thermochemical/url_slug:front-matter?cid=kt00UR3FD8&b-q=Recent Advances in Thermochemical Conversion of](https://app.knovel.com/web/view/pdf/show.v/rcid:kpRATCB001/cid:kt00UR3FD8/viewerType:pdf/root_slug:recent-advances-in-thermochemical/url_slug:front-matter?cid=kt00UR3FD8&b-q=Recent%20Advances%20in%20Thermochemical%20Conversion%20of)

Biomass&sort_on=default&b-group-b

- Pandey, A., Larroche, C., Ricke, S., Dussap, C.-G., & Gnansounou, E. (2011). *Biofuels - Alternative Feedstocks and Conversion Processes* (Primera). Amsterdam: Elsevier. Recuperado a partir de <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBAFCP00A/biofuels-alternative/biofuels-alternative>
- Pavi, S., Kramer, L. E., Gomes, L. P., & Miranda, L. A. S. (2017). Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. *Bioresource technology*, 228, 362-367. <https://doi.org//dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.003>
- Pellera, F. M., & Gidarakos, E. (2016). Microwave pretreatment of lignocellulosic agroindustrial waste for methane production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(In Press, Accepted Manuscript), 352-365. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.009>
- Pérez, M., & Martínez, M. (2008). Manejo alternativo de residuos de jardinería. *Kuxulkab*, 14(26), 12. Recuperado a partir de <http://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/874/735>
- Pfeifer, C., Koppatz, S., & Hofbauer, H. (2011). Steam gasification of various feedstocks at a dual fluidised bed gasifier: Impacts of operation conditions and bed materials. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1(1), 39-53. <https://doi.org/10.1007/s13399-011-0007-1>
- Pham, T. P. T., Kaushik, R., Parshetti, G. K., Mahmood, R., & Balasubramanian, R. (2015a). Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions. *Waste Management*, 38, 399-408. <https://doi.org//dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.004>
- Pham, T. P. T., Kaushik, R., Parshetti, G. K., Mahmood, R., & Balasubramanian, R. (2015b). Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions. *Waste Management*, 38(1), 399-408. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.004>
- Poder Ejecutivo. Ley 7200 Autorización o Regulación de la Generación Eléctrica Autónoma o Paralela. (2001).
- Poder Ejecutivo. Reglamento sobre el manejo de residuos sólidos ordinarios N° 36093 (2010).
- Ramírez, F., Carazo, E., Roldán, C., & Villegas, G. (2007). Encuesta de oferta y consumo energético nacional a partir de la biomasa en Costa Rica Año 2006, 340 p.
- Rica, M. de S. de C. (2016). Plan Nacional para la gestión integral de residuos 2016-2021. Recuperado a partir de <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos/sobre-el-ministerio/politcas-y-planos-en-salud/planes-en-salud/3025-plan-nacional-para-la-gestion-integral-de-residuos-2016-2021/file>

- Rodríguez, A. Zaleta, A. Olivares, A. Torres, F. (2010). *Análisis y Diseño de un Sistema de Gasificación de Biomasa 1. Memorias del XVI Congreso Internacional anual de la SOMIM*.
- Rondón, E., Szantó, M., Pacheco, F., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*. Santiago, Chile.
- S.A, B. y S. C. (2013). *Pesaje de Residuos Sólidos Residenciales y pesaje de Residuos Sólidos Comerciales de la Municipalidad de Escazú*. Escazú, Costa Rica.
- Shi, Y., Ge, Y., Chang, J., Shao, H., & Tang, Y. (2013). Garden waste biomass for renewable and sustainable energy production in China: Potential, challenges and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 432-437. <https://doi.org/2075/10.1016/j.rser.2013.02.003>
- Soto, S. (2005). *Situación actual de los residuos sólidos en Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Soto, S. (2006). *Situación actual de los desechos sólidos en Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Soto, S. (2010). *Generación y manejo de residuos sólidos*. San José, Costa Rica.
- Soto, S. (2016). Situación del manejo de desechos sólidos en Costa Rica. *Undécimo informe estado de la nación en desarro humano sostenible, XI*. Recuperado a partir de http://estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/011/Situacion_manejo_desechos_solidos.pdf
- Speight, J. G. (2016). 6 - Production of syngas, synfuel, bio-oils, and biogas from coal, biomass, and opportunity fuels. En J. Oakey (Ed.), *Fuel Flexible Energy Generation* (pp. 145-174). Boston: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-378-2.00006-7>
- Tello, P., Martínez, E., Daza, D., Soulier, M., & Terraza, H. (2010). *Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en ALC. Organización Panamericana de la Salud. Asociación Interamericana de Ingeniería sanitaria y ambiental. Banco Interamericano de Desarrollo*. Recuperado a partir de [https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/3286/Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010.pdf?sequence=2](https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/3286/Informe%20de%20la%20Evaluación%20Regional%20del%20Manejo%20de%20Residuos%20Sólidos%20Urbanos%20en%20América%20Latina%20y%20el%20Caribe%202010.pdf?sequence=2)
- Vaish, B., Srivastava, V., Singh, P., Singh, A., Kumar, P., & Pratap, R. (2016). Exploring untapped energy potential of urban solid waste., 1, 20.

7. APÉNDICES

APÉNDICE 1: MINUTA DE REUNIÓN MUNICIPALIDAD DE ESCAZÚ. PROYECTO DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DE JARDINERÍA.

Fecha: 23 de agosto de 2016.

Hora: 1:00 p.m. a 3:00 p.m.

Lugar: Plantel Municipalidad Escazú, San José, Costa Rica.

Asistentes: Pilar Delgado, Jefe del Departamento de Recolección de Residuos.

Maybi Rojas Soto, estudiante de Ingeniería Ambiental

Asuntos tratados

- Situación actual de los residuos orgánicos de jardinería.
- Situación actual de los residuos orgánicos de ferias del agricultor.
- Tasa de generación de residuos orgánicos de jardinería.

Acuerdos tomados

Para el proyecto se va a tomar en cuenta únicamente los residuos provenientes de jardinería debido a que los residuos de ferias del agricultor están siendo gestionados directamente por los generadores mediante compostaje, esto gracias a capacitaciones que los vendedores de la feria recibieron por parte de una estudiante japonesa de intercambio.

Además, la tasa de generación de residuos de jardinería ha aumentado significativamente año tras año.

Actividades por realizar

Realizar la ruta de recolección de residuos orgánicos de jardinería junto al personal de los camiones con la finalidad de identificar de manera general la composición de las bolsas recolectadas y observar la variación de las cantidades recolectadas por zona, entre otras variables que se puedan determinar.

La reunión tuvo una duración de aproximadamente una hora. Se dio respuesta a las preguntas guía y se conversó acerca del proceso que se ha llevado en el cantón para lograr la educación ambiental de los miembros de la comunidad. Además, la señora Pilar resalta la necesidad de encontrar una alternativa de tratamiento a los residuos de jardinería para que no tengan como destino final el relleno sanitario. Se conoció parte del personal del Departamento de Recolección de Residuos. Finaliza la reunión alrededor de las 3:00 p.m., acordando una visita posterior para realizar el recorrido de recolección de estos residuos.

Entrevista para los encargados del Departamento de Servicios Comunes y de Recolección de Residuos.

Generación de residuos orgánicos en el cantón de Escazú.

1. ¿Qué piensan ustedes acerca de los residuos orgánicos? ¿Conocen las repercusiones de una inadecuada gestión integral de los mismos?

La Municipalidad de Escazú en 2010 tuvo la iniciativa de brindar el servicio de recolección de residuos orgánicos de jardinería debido a que existía una inadecuada disposición por parte de la población, ya que la depositaban en lotes baldíos o en ríos.

Existe conciencia acerca de la problemática que genera una inadecuada gestión de los residuos sólidos orgánicos.

2. ¿Cómo surge la iniciativa de recolección de residuos de jardinería? ¿Qué se tenía planeado inicialmente?

Iniciativa de la Municipalidad en el 2010. Se planeaba recolectar los residuos con la finalidad de resolver un problema de saneamiento, pero no esperaban tan buena respuesta por parte de la población y tampoco visualizaron el crecimiento exponencial de la tasa de generación de residuos que se dio.

3. En términos económicos, ¿cuánto le cuesta a la municipalidad este servicio?

11000 colones por tonelada, esto considerando únicamente el costo de disponerlo en el relleno sin considerar combustible por el concepto de traslado ni mano de obra.

4. ¿Se ha pensado en algún aprovechamiento de esos residuos?

Si se han tenido intenciones, pero no se han desarrollado proyectos.

5. ¿Por qué surgió la iniciativa de recolectar los residuos de las ferias?

Como parte de las técnicas de gestión integral de residuos de la Municipalidad, pero a la fecha ya no se brinda este servicio debido a que la Municipalidad, a través de una estudiante de intercambio, brindó capacitación sobre compostaje a los agricultores, los cuales recolectan los residuos que ellos generan y los utilizan para obtener abono para sus cultivos. De modo que ya no existen residuos en cantidades significativas que recolectar de esta actividad.

APÉNDICE 2: MINUTA DE REUNIÓN MUNICIPALIDAD DE ESCAZÚ. ENTREVISTA A LOS ENCARGADOS DE LA RECOLECCIÓN DE RESIDUOS DE JARDINERÍA.

Fecha: 31 de agosto de 2016.

Hora: 10:00 a.m. a 11:30 a.m.

Lugar: Plantel Municipalidad Escazú, San José, Costa Rica.

Asistentes: Pilar Delgado, Jefe del Departamento de Recolección de Residuos.

Maybi Rojas Soto, estudiante de Ingeniería Ambiental.

Miguel Cabrera, encargado de recolección de residuos de jardinería.

Verny Vargas, encargado de recolección de residuos de jardinería

Asuntos tratados:

- Situación actual de la recolección de residuos de jardinería.
- Análisis visual de una muestra.

Acuerdos tomados:

Durante la visita se entrevistó al personal de recolección y se realizó una serie de preguntas que se adjuntan. Ellos mencionan que la comunidad se ha involucrado con este servicio y que se recolecta como máximo 15 bolsas por casa, debido a la capacidad de recolección, sin embargo, siempre hay más de 15 bolsas por casa, principalmente en los condominios. Ellos emplean entre 4 y 5 camiones todos los miércoles para la recolección. Se menciona que aún existen vecinos que no se acostumbran al horario y disponen los desechos de jardinería en días distintos al miércoles, pero estas no se recolectan hasta ese día.

Con respecto a la muestra la composición observada era de ramas, hojas, césped, troncos, cortezas y con un contenido humedad puesto que es una época del año en la que llueve de manera frecuente.

Actividades por realizar

Queda pendiente que la señora Pilar me facilite mediante correo electrónico el Plan de Gestión de Residuos Sólidos del cantón y un estudio de composición de los residuos realizado por una empresa privada.

La reunión tuvo una duración de aproximadamente una hora.

Generación de residuos orgánicos en el cantón de Escazú.

¿Con qué frecuencia se recolectan los residuos de jardinería?

Todos los miércoles la Municipalidad recolecta residuos de jardinería. Existen dos rutas principales definidas, realizadas una cada semana, por lo que para una misma casa el servicio se brinda cada 15 días. Este servicio tiene una cobertura total del cantón.

Después de recolectarlos, ¿qué se hace con ellos?

¿Hacia dónde van?

Van directo al Parque de Tecnología Ambiental Uruka.

¿Existen rutas diseñadas para la recolección eficiente? ¿Hay algún sector donde se recolectan los residuos de jardinería en mayor cantidad?

Existen 9 rutas divididas en dos días diferentes, el primer miércoles del mes para las comunidades ubicadas al este del cantón y al sur del Palacio Municipal y el segundo para las comunidades ubicadas al oeste del cantón y al norte del Palacio Municipal. La primera ruta es la más pequeña en la que emplean 4 camiones y en la más extensa emplean 5.

¿Han detectado algún problema con ese servicio?

El principal problema es que las familias disponen más de 15 bolsas por casa y estas se acumulan debido a que ese es el máximo que se puede recolectar por casa.

Si las personas no se hacen cargo de los desechos que quedan sin recolectar, estos se acumulan en el sitio de disposición.

APÉNDICE 3. RECORRIDO DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS DE JARDINERÍA



Figura A.3.1 Fotografía del trabajo de recolección de residuos de jardinería.



Figura A.3.2 Fotografías de varias muestras de los residuos de jardinería del cantón de Escazú.



Figura A.3.3 Fotografías de bolsas de residuos de jardinería por vivienda.



Figura A.3.4 Fotografías del pesaje de residuos de jardinería.

8. ANEXOS

ANEXO 1: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO MEDIDOR DE HUMEDAD Y PRUEBAS REALIZADAS



Figura A.1.1 Descripción de la balanza de humedad

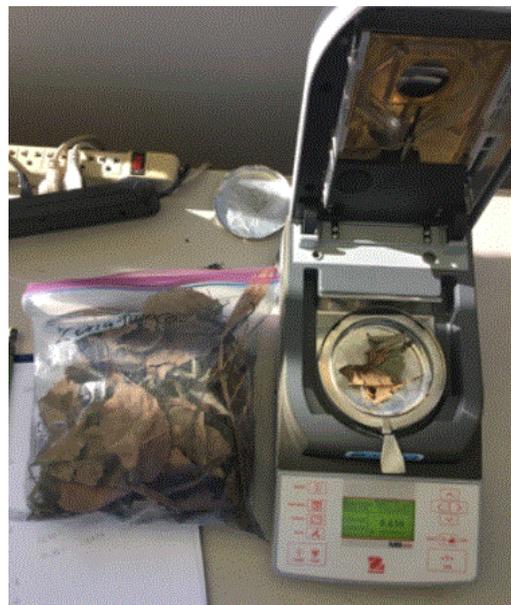


Figura A.1.2 Ilustración de las pruebas de medición de humedad.

ANEXO 2: DESCRIPCIÓN DE LA BOMBA CALORIMÉTRICA Y PRUEBAS REALIZADAS.



Figura A.2.1 Ilustraciones del equipo de determinación de poder calórico.

ANEXO 3: PRECIOS MENSUALES POR CONCEPTO DE VENTAS A ICE DISTRIBUCIÓN.

Cuadro A.3.1 Cargos por energía. Tomado de (La Gaceta N° 120, 2017)

| Cargo por energía, por cada kWh | ¢ |
|--|----------|
| Periodo punta | 53,37 |
| Periodo valle | 47,72 |
| Periodo nocturno | 37,12 |

Cuadro A.3.2 Cargos por potencia. Tomado de (La Gaceta N°120, 2017)

| Cargo por potencia, por cada kW | ¢ |
|--|----------|
| Periodo punta | 2830 |
| Periodo valle | 2830 |
| Periodo nocturno | 0 |

