

“Potencialidades del tratamiento de los residuos sólidos urbanos para el desarrollo sostenible”

Autores: Deysi Beatriz Díaz González, Adrián A. Moreno Águila, Lianys Ortega Viera, Elina Fernández Santana, José María Ameneiros Martínez

Correo: (lortega@quimica.cujae.edu.cu)

Resumen

La progresiva inquietud por el medio ambiente se evidencia cuando el deterioro ambiental, la extinción continua de las especies y la repercusión de la producción reflejan los grandes problemas ambientales existentes. El concepto de desarrollo sostenible adquiere repercusión internacional con el Informe *Brundtland* presentado por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo y se define el término como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras”. Uno de los temas ambientales importantes para la construcción de la sostenibilidad es el de los residuos. Es por ello que este trabajo tiene como objetivo: valorar las potencialidades de los residuos sólidos urbanos para el desarrollo sostenible, exponiendo como caso de estudio la evaluación de las potencialidades de los residuos generados en el campus Cujae. A partir de la evaluación preliminar se obtiene un potencial de generación de electricidad de entre 17,78 MWh y 143, 57 MWh de electricidad según las tecnologías: termo combustión, biogás de relleno sanitario, gas por pirólisis y gasificación por plasma. La más eficiente resulta ser gas por pirólisis, con un ahorro económico de 810 850 CUP mensual para el país. Valores importantes en la búsqueda del camino hacia una sociedad próspera y sostenible.

Palabras clave: aprovechamiento, desarrollo sostenible, electricidad, residuos sólidos urbanos

I. INTRODUCCIÓN

La población a nivel mundial es dependiente de los recursos naturales para satisfacer sus necesidades como son: la alimentación, salud, y servicios energéticos, entre otros.

La progresiva inquietud por el medio ambiente y su relación con la economía empieza a evidenciarse después de la Segunda Guerra Mundial, cuando el deterioro ambiental, la extinción continua de especies y la repercusión de la producción reflejan, entre otras razones, los grandes problemas ambientales de esa etapa. En este contexto destaca el I Informe del Club de Roma en 1972 (Meadows, Randers et al. (1972)), “Los límites del crecimiento”, en el que se concluye que: [...] si se mantienen las tendencias actuales de crecimiento de la población mundial, industrialización, contaminación ambiental, producción de alimentos y agotamiento de los recursos, este planeta alcanzará los límites de su crecimiento en el curso de los próximos cien años. El resultado más probable sería un súbito e incontrolable descenso tanto de la población, como de la capacidad industrial (Meadows, Randers et al. 1972, Báez 2020)

Sin embargo, no es hasta 1987 que se formaliza el concepto de desarrollo sostenible y adquiere repercusión internacional con el Informe *Brundtland* presentado por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. La comisión, creada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 1983, define el término como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras” (Autores 1987, Báez 2020).

La construcción de una agenda pública vinculada a la producción sustentable requiere de un abordaje integral de los grandes temas ambientales de esta época: Residuos es, sin duda alguna, uno de ellos.

Los residuos sólidos (RS) son un problema común en las ciudades y deben ser entendidos desde una visión metabólica. Es decir, las ciudades son sistemas complejos disipativos, que necesitan materiales y energía para satisfacer las funciones y estructuras de estas. En este proceso, dichos materiales y energía se degradan en forma de desechos, que si no son manejados adecuadamente constituyen un reto para su propia sostenibilidad.

La producción de residuos sólidos urbanos (RSU) ha aumentado en todo el mundo como consecuencia del incremento de la población, las actividades humanas y el desarrollo de la tecnología. Adicionalmente, la gestión en la disposición y control de los RSU es compleja debido a la variedad y cantidad de desechos, a un sistema de recolección ineficiente, a la inadecuada disposición final, a bajos presupuestos asignados al manejo de los residuos, impactos al ambiente, falta de participación ciudadana, y a los patrones de consumo de la sociedad.

La generación de RSU constituye una problemática mundial. Tiende a agravarse debido al incremento sostenido de la producción y el consumo de bienes y servicios, particularmente en las sociedades desarrolladas, las que transfieren estos modelos de consumo a los países en vías de desarrollo (Flores 2009). Esta situación se torna más dramática en la medida que continúa tomando auge la implementación de los patrones de consumo que redundan en el ciclo de producir, consumir y desechar, que no solo conlleva al agotamiento de los recursos que se disponen en la naturaleza, sino que incrementa la generación de residuos orgánicos e inorgánicos que, de no recibir un tratamiento adecuado, elevan considerablemente los efectos nocivos sobre el planeta y sus habitantes (Rosario, Toledo et al. 2014). Al respecto, (Rebolledo 2009) plantea que el agravamiento de la situación en cuanto a la generación de los RSU en los últimos años, se debe de manera esencial al desarrollo industrial, las aglomeraciones en torno a las ciudades y el desarrollo desproporcionado de algunos municipios.

La gestión de los RSU, a pesar de que constituye un elemento esencial de las ciudades sostenibles, sanas e inclusivas, suele pasarse por alto, sobre todo en los países de ingreso bajo. Esta situación ha llevado a un replanteamiento del tema y un cambio de actitud, que considera las cuestiones medioambientales de gran relevancia social. Hoy resulta común asemejar calidad de vida, con el disfrute de un medio ambiente lo más íntegro y lo menos deteriorado posible (Broche and Ramos 2014) Esto requiere de mecanismos capaces de recuperar y gestionar adecuadamente estos productos fuera de uso, con el objetivo de contribuir a una apropiada eliminación de los mismos.

En la Agenda 21 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) se establecen las bases para un manejo integral de los residuos sólidos municipales (RSM) como parte del desarrollo sostenible (Autores(a) 2018). Las metas y los esfuerzos requeridos en temáticas de medio ambiente se enunciaron dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la declaración del Milenio en el año 2000 (Graziani 2018). En ellos, se establece que el manejo de los residuos debe contemplar la minimización de su generación, el reciclaje, la recolección y el tratamiento, y disposición final, adecuados. También, se indica que cada país y ciudad establecerán sus programas para lograr lo anterior de acuerdo con sus condiciones locales y a sus capacidades económicas. Esta problemática de alcance mundial debe conducir a aumentar la conciencia de los estados y de la población en general, sobre la necesidad de implementar políticas y acciones tendientes a minimizar los impactos negativos que produce

la generación incontrolable de los RSU sobre el medio ambiente y la salud humana modificando el obsoleto patrón de economía lineal, por un nuevo paradigma de economía circular.

Para la República de Cuba, el problema de la gestión del reciclaje de los RSM forma parte de la estrategia para el desarrollo socioeconómico del país, una vez aprobados en el VI Congreso del Partido (PCC) y actualizados en el VII Congreso, los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, para la actualización del nuevo modelo económico emprendido por la nación, que busca un desarrollo sostenible y que se preserven las conquistas del socialismo. El discreto, pero paulatino crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) de la nación según el informe de la Oficina Nacional de Estadística e Información (CITMA 2018), demuestra una evolución positiva y de forma sostenida en la economía cubana que ha tenido un efecto significativo en la generación de RSM.

Según la Estrategia Ambiental Nacional (EAN) del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA 2017), la contaminación es uno de los mayores problemas ambientales de Cuba y se plantea en el segundo de sus cuatro objetivos estratégicos hasta el 2020, “la disminución de la contaminación como vía para mejorar la calidad ambiental”. La existencia de un Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030 (PNDES), favorece la solución al incremento sostenido de los RSM. En el país se producen diariamente aproximadamente 26 122 t de RS, lo que representa una tasa de generación per-cápita de aproximadamente 0,66 kg/hab/día. De ellas, solo son recolectadas alrededor del 40 % y de estas últimas, solo el 13 % son recicladas y/o reutilizadas (CITMA 2017); por lo que hay una parte mayoritaria que continúa permaneciendo como residuo, desaprovechando sus potencialidades. A partir de lo anteriormente se plantea como objetivo de esta investigación: Valorar las potencialidades del tratamiento de los residuos sólidos urbanos para el desarrollo sostenible.

II. Materiales y métodos

Procedimiento para la evaluación del potencial energético de los RSU

La evaluación del potencial energético de los residuos sólidos requiere en primer lugar, seguir una secuencia de trabajo que inicia con la selección de los indicadores a utilizar; fijar sus metas y estándares en base a los sistemas de tratamiento de residuales empleados, a su potencial energético, considerando las mejores prácticas nacionales e internacionales del sector (*Benchmarking*); realizar los cálculos de la valorización energética; identificar las brechas o desviaciones de los indicadores con respecto a las metas desde los puntos de vistas cuantitativo y cualitativo considerando las tres dimensiones del desarrollo sostenible (ambiental, económica y social) y proponer las políticas o medidas de corrección. Para dar cumplimiento al objetivo de la investigación solo se desarrollan los tres primeros pasos de la secuencia descrita (Columbié, García et al. 2021).

El anterior procedimiento de trabajo debe estar alineado de forma causal o funcional al marco de trabajo de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), sus metas y sistema de indicadores. Para estimar el potencial de valorización de los residuos sólidos, se toman como referencia otras investigaciones que abordan el tema a partir de las diferentes técnicas de tratamiento. Las cuales, a base de procedimientos experimentales, seguimiento y observación de las diferentes tecnologías logran calcular cuanta energía se puede obtener de una tonelada de RS (Columbié, García et al. 2021). La tabla 1 muestra los valores de potencial de valorización según las diferentes tecnologías.

Tabla 1. Potencial de valorización por tecnologías (Columbié, García et al. 2021)

Tecnología	Potencial de valorización por t de RS	Fuente
Termo combustión	400 - 600 kWh	(Soto 2013)
Biogás de relleno sanitario	464 - 646 kWh	(López 2015)
Gas por pirólisis	928 - 3 230 kWh	(Millan 2014, López 2015)
Gasificación por plasma	600 - 900 kWh	(Soto 2013)

Procedimiento para la evaluación preliminar del potencial energético de los RSU en el campus Cujae

El presente trabajo de investigación tiene un enfoque cuantitativo con los siguientes alcances de estudio según la literatura consultada (Columbié, García et al. 2021).

- **Según la intervención del investigador:** el tipo de estudio es observacional porque no existe intervención del investigador sobre los resultados, las mediciones reflejan la evolución natural de los eventos, ajena a la voluntad del investigador
- **Según la planificación de la medición de la variable de estudio:** el tipo de estudio es prospectivo porque el investigador administra sus propias mediciones, la información recolectada posee el control del sesgo de medición
- **Según el número de mediciones de la variable de estudio:** el tipo de estudio es transversal porque la investigación es observacional y analiza datos de variables recopiladas en un periodo de tiempo sobre una población muestra o subconjunto predefinido, teniendo en cuenta la prevalencia, efecto de la población y magnitud de la exposición
- **Según el número de variables de interés:** el tipo de estudio es descriptivo debido a que el análisis estadístico es univariado, porque solo determina condiciones, estima los parámetros de la población a partir de una muestra o describe sus características

Este, se fundamenta en un diseño no experimental porque la investigación se realiza sin la manipulación deliberada de las variables de caracterización de los residuos sólidos como: generación, composición física, densidad y humedad de residuos sólidos generados en la Cujae.

Población: La población de esta investigación está constituida de la siguiente manera: Conocimiento y percepción de la población universitaria: Para determinar esta dimensión, la población objetivo son los alumnos, docentes, administrativos, personal de limpieza y terceros de la Cujae, durante el ciclo académico 2023.

Muestra: la muestra se obtuvo de la siguiente manera: Conocimiento y percepción de la población universitaria: Para resolver esta dimensión, la determinación del tamaño de la muestra se procede aplicando la ecuación 1:

$$n = \frac{NZ^2pq}{NE^2 + Z^2pq} \quad \text{ec. 1}$$

Donde:

P (proporción de éxito) :0,5 (-)

Q (proporción de fracaso) :0,5 (-)

N (tamaño de la población de la Cujae)

Z (valor de la distribución normal a una confianza de 95 %) :1,96

E (error de estimación) :0,05 (-)

Características físicas de los residuos sólidos: para determinar esta dimensión, no se considera determinar un tamaño de muestra, debido a que se trabaja con los residuos sólidos generados por la población total del ciclo académico 2023 de la Cujae.

Técnica e instrumentos de recolección de datos: las técnicas e instrumentos de recolección de datos son fuentes primarias (estudios prospectivos), ya que se realizan en base a la confiabilidad, validez y objetividad, con la finalidad de obtener resultados consistentes y coherentes con la más mínima incertidumbre en esta investigación, por ello se realiza según se expresa a continuación:

Descripción general del campus Cujae

La Cujae está integrada por más de 40 edificios y abarca un área de 398 000 m² donde están comprendidos aulas, laboratorios, salas de conferencias, centros de investigaciones, bibliotecas, talleres, almacenes, dormitorios, comedores, cafeterías, oficinas administrativas, oficinas docentes, teatros, gimnasios deportivos, campos deportivos, dispensario médico, casa de recreación estudiantil, departamento de ediciones, imprenta, y todo tipo de instalaciones que coadyuvan a una correcta preparación de los educandos.

Cuenta con 9 facultades donde se estudian trece carreras. Y cuenta con 12 centros de investigaciones, asociados casi en su totalidad con las facultades. Los mismos constituyen el núcleo por excelencia del trabajo científico, donde se agrupan los colectivos de resultados más relevantes y de mayor importancia. Tiene 1 858 trabajadores y más de 7 500 estudiantes aproximadamente (Cujae 2023).

Las facultades son: Facultad de Arquitectura, Facultad de Automática, Facultad de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería Informática, Facultad de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería Química y Facultad de Telecomunicaciones.

Los tipos de recipientes contenedores de residuos sólidos existentes en la Cujae son los llamados latones que son flotantes: recipientes que pueden ser movilizables por una persona, son de polietileno de alta densidad, reuniendo las mejores condiciones de fluidez, con gran resistencia y tienen una altura de 1 200 mm, 1 265 mm de largo y 740 mm de ancho, con un volumen aproximado de 1 m³. Tiene agarres para facilitar la recogida de basura, que responden a las exigencias de la legislación laboral. El contenedor está formado por dos partes: el cuerpo y la tapa. La unión entre las dos partes se realiza por medio de dos bisagras. La parte exterior de la tapa es prácticamente lisa y abombada por lo que no retiene suciedad, ni agua cuando son lavados. También existen áreas al aire libre destinadas a receptar residuos de jardinería y no poseen ningún tipo de protección contra las inclemencias climáticas (intecoAstur 2023).

Procedimiento para el estudio de caracterización de los RSU

Los estudios de generación y caracterización (ver tabla 2), son útiles para obtener información confiable sobre las cantidades y composición de los residuos, que permite, por ejemplo, hacer las proyecciones necesarias para la planificación de un sistema de recolección de los residuos en una comunidad urbana y/o determinar las cantidades de materiales aptas para reciclar y/o reutilizar (Autores 2018).

La caracterización de los residuos permite planificar las acciones para el manejo de estos, así como encontrar las soluciones más apropiadas a los problemas que presentan en las operaciones básicas de almacenamiento, recolección, transporte y disposición final, evitando el deterioro de la calidad ambiental y la salud de personas (Silveria 2019).

Tabla 2 Ventajas y desventajas del estudio de caracterización (Coracora 2013)

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Permite iniciar e implementar un sistema de manejo de residuos sólidos de acuerdo a las características de los residuos sólidos	Se requiere de un espacio amplio para seleccionar los residuos
Permite tener un conocimiento del potencial económico que representan los residuos diferenciados para el proceso de reciclaje	Existe cierto rechazo de la población para ceder un área en la zona urbana destinada a esta labor
Permiten realizar proyecciones en los volúmenes de generación de residuos sólidos, lo que sería de utilidad para diseñar la construcción de rellenos sanitarios y la adquisición de equipos adecuados para la recolección y transporte	Si la muestra no es representativa se desvirtúa la información

Algunos métodos de caracterización evalúan los residuos en la disposición final, ya mezclados y compactados, otros se han aplicado desde la fuente de generación, también se han aplicado técnicas de caracterización en las plantas clasificadoras.

Existen diversas técnicas de caracterización aplicadas en cada región y país con diferentes criterios de muestreo y parámetros, que se adaptan a las necesidades de cada caso. Se realiza una revisión exhaustiva de conceptos, normas de caracterización, metodologías de algunos organismos oficiales, propuestas elaboradas por algunos investigadores y metodologías aplicadas en algunos estudios de caracterización de RSU y a partir de esto, se observa que no hay una metodología de caracterización general o estándar, con diversos criterios de muestreo y precisión, que hacen que no se disponga de un patrón de referencia a nivel local, regional e internacional.

Normativa aplicada para la realización de los estudios de caracterización de RSU

El método de trabajo que se utiliza en este estudio de caracterización de los RSU, se realiza de acuerdo a lo establecido por las siguientes normas:

- NORMA ASTM 5231-92 (re-aprobada en el año 2008) “*Standard Test Method for Determination of Com-position of Unprocessed Municipal Solid Waste*” (Salcedo 2008)
- NORMA IRAM 29.523:2003 / 2010. “Calidad ambiental - Calidad del suelo: Determinación de la composición de residuos sólidos urbanos sin tratamiento previo” (IRAM29523 2010)
- CEPIS 2005. Procedimientos estadísticos para los estudios de caracterización de los residuos sólidos. Hoja de divulgación técnica ISSN: 1018/5119 HDT/ N°97 (CEPIS 2005)

Determinación del peso volumétrico de residuos

El procedimiento correcto que se debe hacer es el siguiente:

Para determinar el peso volumétrico de los residuos, recolectados en las zonas determinadas en los términos de referencia (TDR), se depositan los residuos en el contenedor plástico, de 1 m³, hasta que este se complete o en otros casos, hasta el nivel de llenado con los residuos disponibles.

Posteriormente, el recipiente se golpea contra el suelo tres veces desde una altura no superior a los 10 centímetros.

Nuevamente se vierten residuos al contenedor hasta llenarlo, evitando hacer presión para no alterar el valor del peso volumétrico; cuando no se llena el recipiente con los residuos, se anota el volumen que se alcanza en el contenedor.

Una vez que el contenedor esté listo para pesarse, se coloca en la balanza electrónica de 450 kg y sensibilidad de 100 g, y se anota su valor en peso.

El valor neto de los residuos se obtiene restando la tara (peso del contenedor vacío), al valor medido en la balanza. Este peso se divide entre el volumen del recipiente para obtener el peso volumétrico de los residuos sin compactar.

Para el cálculo del peso volumétrico se utiliza la ecuación 2:

$$PV = \frac{\text{PESO}}{\text{VOLUMEN}} \quad \text{ec. 2}$$

Donde:

PV: peso volumétrico de residuos (kg/m³)

Peso de residuos: (kg)

Volumen de residuos: (m³)

Ya que no se cuenta con la instrumentación necesaria, se emplea la ecuación 3 para calcular la masa de los RSU del campus universitario, durante los días que se realiza la observación. Para determinar el volumen se realizan caminatas por el campus universitario, se toman fotografías y se mide utilizando una cinta métrica, el área que ocupa cada uno de los vertederos, así como su altura y con estos, se calcula el volumen ocupado por cada uno de los vertederos al aire libre y de los montículos de desechos de jardín. La tabla 3 muestra el valor de la densidad de cada componente.

$$m = \rho * V \quad \text{ec. 3}$$

Donde:

m: masa de los RSU (kg)

ρ : densidad de cada uno de los componentes (kg/m³)

V: volumen ocupado por los RSU (m³)

Tabla 3 Densidad de los distintos tipos de desechos (Elaboración propia)

Componentes	Densidad (kg/m ³)	Fuente
Papel	500 - 800	(Zanuttini 2008)
Cartón	600 – 1 200	(Pro-Carton 2023)
Metales no ferrosos	2 000 – 5 000	(Autores 2021)
Desechos de jardinería	250 - 300	(Biorresiduos 2022)

Acopio de las muestras de materiales caracterizados

Una vez concluida la caracterización de cada uno de los materiales, se embolsan separadamente cada material en “bolsas limpias”, para su posterior pesaje y registro.

Pesaje de los materiales caracterizados

Finalizada la caracterización de cada uno de los materiales, se procede al pesaje de cada una de las bolsas, conteniendo cada uno de los materiales.

Composición básica de los residuos sólidos urbanos

Las categorías de residuos seleccionadas se presentan en la tabla 4, según componentes que se definieron en la TDR, para la recolección de muestras y caracterización se utiliza la norma ASTM D 5231 – 92 (2008) como base, Norma (IRAM29523 2010).

- Determinación de la composición de los residuos sólidos urbanos sin tratamiento previo
- Calidad ambiental
- Calidad del suelo

De esta manera se realiza un estudio analizando 14 componentes:

Tabla 4 Composición básica de los RSU (Autores 2018)

Material básico componente	
Papel y cartón	Maderas
Botellas plásticas	Residuos de jardín
Plásticos diversos	Textiles
Metales ferrosos	Pañales descartables
Metales no ferrosos	Aparatos electrónicos
Vidrios	Otros
Biodegradables	Misceláneos < 15 mm

Posteriormente, se calcula el porcentaje de cada componente teniendo en cuenta la ecuación 4:

$$\text{Composición} = \frac{\text{Peso de cada componente}}{\text{Peso total de los residuos}} * 100 \quad \text{ec. 4}$$

Donde:

Composición de los RSU: (%)

Peso de cada componente: (kg)

Peso total: (kg)

Para determinar el porcentaje promedio de cada componente, se efectúa un promedio simple, es decir, sumando los porcentajes de todas las mediciones de cada componente y dividiéndolo de acuerdo con el periodo de caracterización.

Procedimiento para el estudio de generación

Los estudios de generación de residuos sólidos urbanos, son útiles para obtener información confiable sobre los volúmenes de RSU dispuestos para disposición final, que permite, por ejemplo, hacer las proyecciones necesarias para la planificación de un sistema completo de recolección y disposición final de los residuos en una comunidad urbana, incluyendo, recorridos de servicios, equipamiento a incorporar, determinación de los volúmenes de excavaciones en enterramientos sanitarios, estimaciones de generación de lixiviados y de gases en fosas de disposición final de los residuos, entre otros.

Para la cuantificación de la cantidad de los residuos sólidos urbanos que se generan, se utiliza el índice de Generación de Residuos Sólidos Per Cápita (GP), su estimación depende de la cantidad de población y características socioeconómicas. Viene expresada en las unidades kg/(hab*día), con este índice se puede determinar la cantidad de maquinaria necesaria, así como equipos y personal para las actividades de recolección (Quinteros, González et al. 2020).

Para determinar la producción de residuos sólidos, es preciso pesar todos los vehículos recolectores durante un período de tiempo y dividir la carga total por la población atendida y por la duración del estudio. Si no se cuenta con básculas en los sitios de disposición de los residuos para pesar los camiones recolectores, se pueden emplear otros métodos para determinar la generación.

En este estudio se exploró una alternativa diferente para inferir la generación de residuos, cuando los recursos para un estudio de esta naturaleza son limitados.

La GP es un cálculo que se utiliza para determinar las cantidades de residuos sólidos que genera, en promedio, una unidad por un determinado tiempo, según se muestra en la ecuación 5 (Trujillo 2020).

$$GP = \frac{W}{UT} \quad \text{ec. 5}$$

Donde:

GP: Generación de RSU per cápita (kg/(hab*día))

W: Cantidad generada de RSU (kg)

UT: Unidad de tiempo (día)

Consideraciones para la determinación del potencial energético

Con los volúmenes de RS recolectados en la Cujae durante tres semanas, se estima la valorización de los mismos según las distintas tecnologías que pueden encontrarse en la literatura consultada. Según la información analizada, se calcula el potencial de generación de electricidad, según la tecnología utilizada y los diferentes escenarios a través de la ecuación 6:

$$\text{masa} * \text{Potencial de valorización} = \text{generación de electricidad} \quad \text{ec. 6}$$

Donde:

masa: masa de recolección de RSU: (t)

Potencial de valorización: potencial de valorización de cada tecnología por t de RS (kWh)
Generación de electricidad: generación de energía eléctrica con RS recolectados (kWh)

Consideraciones para el análisis económico

Conociendo el consumo de energía eléctrica de la Cujae mensualmente, se puede determinar el ahorro (ecuación 7) que proporciona la utilización de una tecnología de aprovechamiento de RS, para la generación de electricidad con los residuos recolectados en la universidad. También el ahorro en cuanto a combustible, que representa para el país.

ahorro=generación de electricidad*precio del barril de petróleo ec. 7

Donde:

Ahorro: ahorro económico en cuanto a combustible necesario para generar electricidad (MN)

Generación de electricidad: (MWh) o (bep-barriles equivalentes de petróleo)

Precio del barril del petróleo: (MN- moneda nacional)/barril (OPEC 2023)

El ahorro generado por la producción de electricidad con los residuos sólidos de la Cujae representa un a contribución importante a la economía del país.

III. Resultados y discusión

Valoración del potencial energético de los residuos sólidos urbanos

A partir de las investigaciones consultadas (Columbié, García et al. 2021), se determina el potencial de valorización por cada tecnología, ver figura 1. Los resultados y cálculos de las investigaciones empleadas como referencias de las tecnologías tratadas en este estudio, pueden variar en dependencia de la composición gravimétrica y otras características físicas, químicas y biológicas de los RS utilizados en cada una.

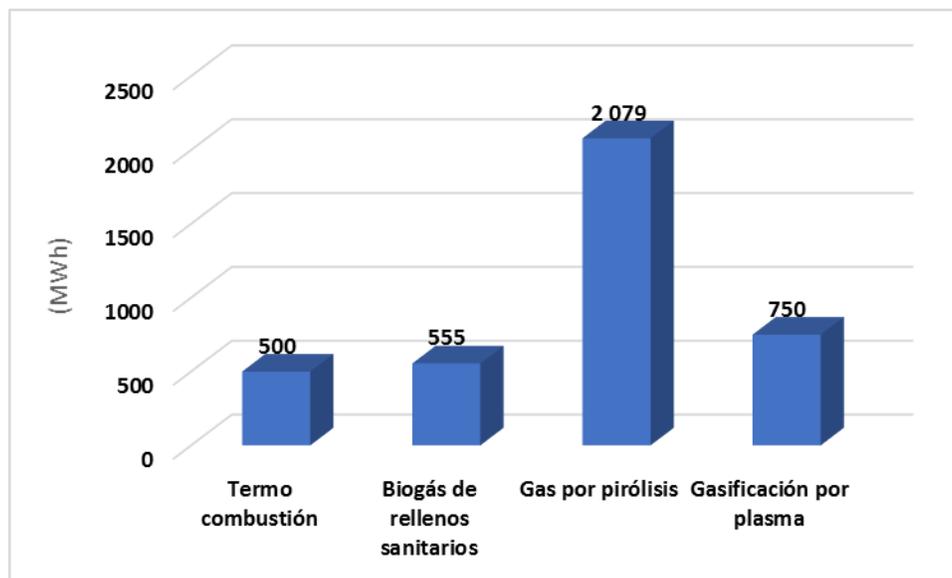


Figura 1 Potencial de valorización por tonelada de residuo sólido

Esta información no está disponible para los RS recolectados en la Cujae, por lo cual los resultados obtenidos deben usarse como una referencia y aproximación al potencial real. Debido a esto, se estima el potencial de valorización para cada tecnología dentro de los

límites inferiores y superiores, según los beneficios energéticos que se podrían obtener. Según (Soto 2013) en una planta de termo combustión una tonelada de desechos podría satisfacer una demanda y consumo entre 400 y 600 kWh.

En biogás de rellenos sanitarios, (*GRS*) según sus siglas en inglés, se produce por descomposición anaeróbica de los residuos urbanos depositados en los rellenos sanitarios. La generación depende del tiempo transcurrido, de la composición de los RSU y de variables meteorológicas como la temperatura del ambiente y la humedad. El uso del *GRS* está determinado por su contenido de metano y el flujo capturado. El porcentaje de sólidos volátiles (SV) presentes en el sustrato equivale al contenido en materia orgánica. Para el 50 % en SV, una fracción orgánica estándar, se estima una cantidad de metano producido entre 550 y 650 m³/t SV y con un porcentaje del mismo del 60 % (López 2015). Debido a estos aspectos y a la degradación biológica incompleta, generalmente se acepta que un volumen máximo aproximado de 200 Nm³ de biogás, puede generarse a partir de una tonelada de RSU dispuestos en el relleno sanitario y 1 Nm³ de biogás puede generar como máximo 2,32 kWh de energía eléctrica y 3,23 kWh de energía térmica en motores de combustión interna con tecnología alemana (Nzila, Dewulf et al. 2010). Entonces por cada tonelada de RSU se podría generar de 464 a 646 kWh.

El volumen de gas producido por pirólisis por tonelada de residuo depende del poder calorífico de este. Para un poder calorífico de 6 MJ/kg se producen alrededor de 400 Nm³ de gas y para un poder calorífico de 12 MJ/kg, se pueden alcanzar valores de hasta 900 a 1 000 Nm³ por tonelada. Debido al aire de combustión, el contenido en partículas de polvo en el gas limpio es 0,25 mg/Nm³ (Millan 2014).

El tratamiento de residuos mediante gasificación por plasma representa el proceso de obtención de energía (kWh) por tonelada de residuos sólidos, hasta 1,5 veces mayor que el proceso mediante incineración, al tener mejor eficiencia de generación eléctrica (Yassin, Lettieri et al. 2009).

En el caso de los países de América Latina y el Caribe (ALC), los RSU tienen un mayor contenido de materia orgánica, una humedad que varía de 35 % a 55 % y un mayor peso específico, que alcanza valores de 125 a 250 kg/m³ (Reyes 2006).

Evaluación preliminar del potencial energético de los residuos sólidos del campus Cujae

El objetivo perseguido en esta evaluación preliminar es la toma de muestras representativas, para la determinación de la composición porcentual de los principales componentes y subcomponentes de los RSU.

El alcance del estudio está en la toma de muestras directamente desde los lugares en que son dispuestos los residuos por los habitantes y la clasificación exhaustiva de modo que la muestra resulte representativa. La finalidad del mismo es generar información cuantitativa y cualitativa, sobre las características de los RSU, generados en el campus Cujae.

Caracterización de los residuos sólidos urbanos

Con un total de 31 contenedores de para la recolección de los RSU en todo el campus universitario. Se realizan caminatas y una medición semanal durante 3 semanas, del volumen del área ocupada por los residuos sólidos. La caracterización de los residuos sólidos urbanos tiene parámetros muy importantes para la toma de decisiones, en lo que se refiere a proyección y diseño de los sistemas de manejo y disposición final de los residuos, por ello se

pone especial atención a este estudio desde la selección de las muestras hasta el análisis estadístico.

La finalidad del mismo es generar información de las características de los residuos sólidos urbanos generados en las distintas zonas, mediante el manejo de métodos de muestreo estadístico y análisis señalados en las normas. De esta manera fundamentar las alternativas sobre el manejo y eliminación de los residuos.

La tabla 5 muestra la masa de los residuos sólidos recolectados en el campus Cujae para cada una de las mediciones, mediante la ecuación 3 y la tabla 3.

Tabla 5 Masa total de RSU recolectados en cada una de las mediciones durante las semanas de estudio

Medición	Masa total de RSU (kg)	Masa total de RSU (t)
1	50 753,13	50,75
2	40 053,13	40,05
3	42 550,00	42,55

Caracterización física de los residuos sólidos urbanos

Se realiza la caracterización de los residuos sólidos urbanos en el campus Cujae resultando sus componentes esencialmente en papel, cartón, residuos de jardín y metales no ferrosos.

A continuación se muestran en la tabla 6, los valores correspondientes a la masa de los principales componentes de los residuos, según el tipo de material, en las tres mediciones realizadas; así como el porcentaje que representan los distintos tipos de componentes respecto al total (Ver figura 2).

Tabla 6 Masa de los principales componentes de los residuos sólidos en las mediciones de estudio

Componente	Masa (t)		
	Medición 1	Medición 2	Medición 3
Papel	13,49	14,18	25,35
Cartón	15,53	14,40	6,08
Residuos de jardín	11,24	7,98	4,13
Metales no ferrosos	10,50	3,50	7,00

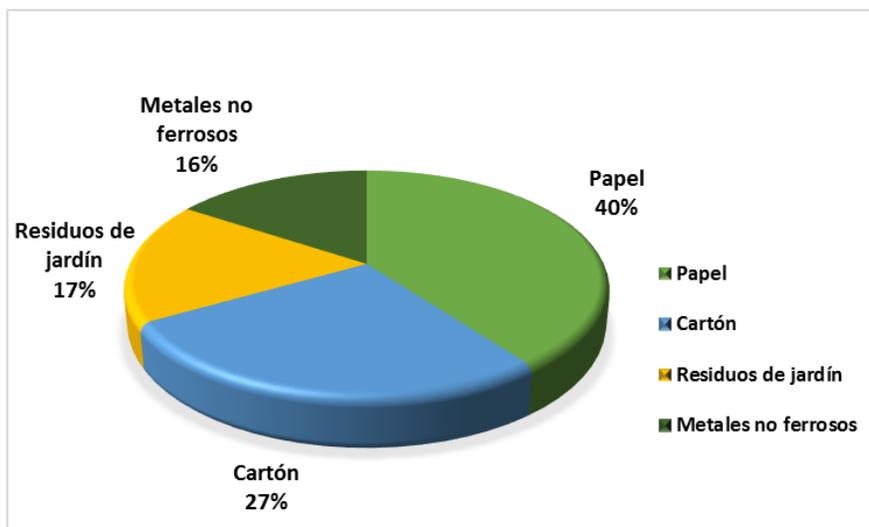


Figura 2 Porcentaje total de los distintos tipos de materiales según la caracterización de los RS en el campus Cujae

Como se muestra en la figura 2 los componentes de mayor presencia en el campus universitario son el papel y el cartón con un 40 y un 27 % respectivamente. Como era de esperarse al ser una institución escolar, estos materiales son los que más prevalecen por ser insumos esenciales en este tipo de centros. Estos resultados también fueron obtenidos por (Caldera, 2016) en su artículo el cual indica que entre los residuos orgánicos, papel y cartón alcanzan cerca del 70 % del total de residuos de las universidades.

Estudio de generación

Generación per cápita por zona técnica

Los resultados de este estudio se obtienen teniendo en consideración, que no se pudo realizar la medición de la masa de los vehículos de compactación y que se efectúan cálculos estimados con base a la recolección de muestras de los residuos sólidos urbanos para los estudios de generación y caracterización solicitados.

El conocimiento de la producción total de los residuos sólidos urbanos, permite tomar decisiones sobre el equipo de recolección más adecuado, la cantidad de personal, las rutas, la frecuencia de recolección, la necesidad de áreas para el tratamiento y la disposición final, los costos y el establecimiento de la tarifa de aseo.

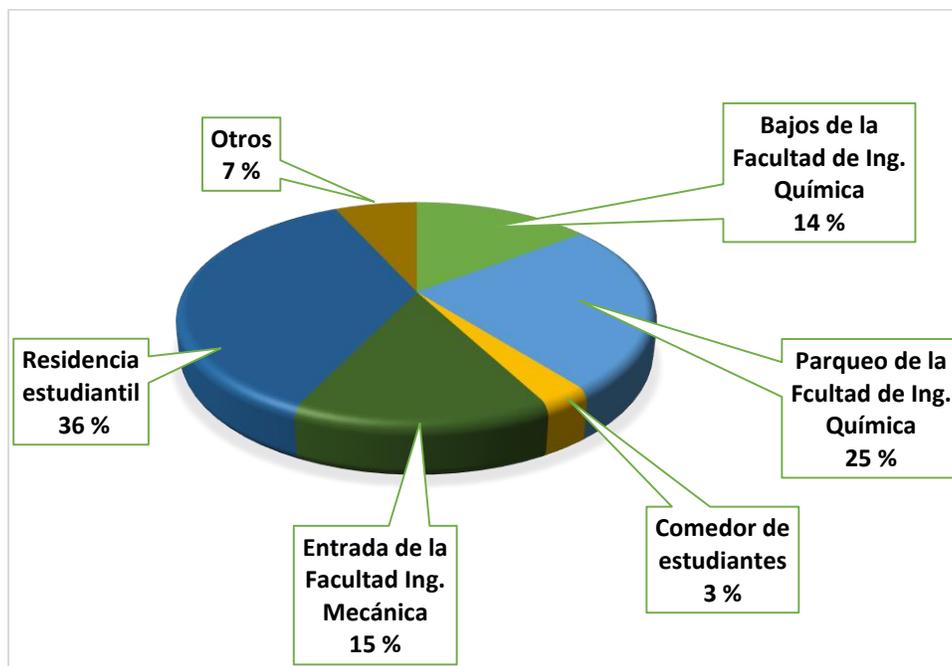


Figura 3 Porcentaje de generación de RSU por zona técnica

En la figura 3 se observa el porcentaje de generación de RSU por zona técnica. De la generación y composición de los desechos generados en el campus Cujae, se puede decir según este estudio preliminar, que el área de mayor generación es la residencia estudiantil, lo que es directamente proporcional a la población de esa zona, le sigue el área del parqueo de la facultad de Ingeniería Química que unido al volumen de RS de los bajos de la facultad, llega a ser una cifra preocupante, concentrada en un área donde transitan, trabajan y estudian muchas personas. En las demás áreas, su consideración no alcanza a afectar de manera apreciable la cantidad total de residuos generados, salvo cuando hay una demora extrema en recoger los RS del campus universitario por parte de Comunales u otro responsable.

Según los muestreos de residuos realizados en ciudades más grandes y en algunas poblaciones pequeñas, rurales y áreas dispersas en las zonas, se ha encontrado que la GP presenta intervalos entre 0,580 y 0,800 kg/hab/día. Tales valores son bastante representativos para la mayoría de estas poblaciones. En el caso del presente estudio en el campus Cujae, la generación per cápita es 4,7 kg/hab/sem o lo que es lo mismo, 0,67 kg/hab/día; lo cual es consecuente y muy similar a la generación per-cápita en el país, que es de aproximadamente 0,66 kg/hab/día (ONEI, 2017).

Algunos de los problemas que pudieran incidir en la gestión actual del manejo de RSU son los siguientes:

1. Falta de herramientas y el equipo de seguridad necesario para la recogida de residuos sólidos
 - Mascarillas, estas pueden evitar algún tipo de enfermedad (influenza)
 - Botas, sirve para evitar el contacto de algún material corto-punzante, también es necesario para compactar los residuos en los contenedores
 - Coche recolector de residuos con capacidad determinada, esto puede evitar que la persona encargada cargue exceso de peso con la columna
2. Falta de implementos para la higiene del personal de limpieza

3. Residuos sólidos depositados en lugares no adecuados y cerca de la facultad y el docente, lo cual constituye un riesgo para la salud de las personas que estudian o trabajan en el centro
4. Las personas al momento de arrojar los residuos en los contenedores, muchas veces los dejan en el piso fuera de estos
5. Los contenedores de residuos acumulados se desbordan haciendo que los residuos se desperdicien, provocando una mala imagen de la institución, y se tenga en potencia, una proliferación de vectores, muy cerca de las edificaciones y pasos peatonales, poniendo en riesgo la salud de la comunidad universitaria
6. Demora en la recolección de los residuos por parte de los responsables, permaneciendo los RSU, por más de una semana bajo las inclemencias climáticas
7. Residuos sólidos peligrosos tales como residuos sólidos de laboratorios son arrojados igualmente a los contenedores
8. Los residuos sólidos generados por el mantenimiento de jardines y áreas verdes, se acumulan en las mismas áreas donde se realiza la actividad al área libre hasta su descomposición, dando una mala imagen a la institución y en potencia una proliferación de vectores. Los residuos de fácil biodegradación, como césped picado, no son aprovechados para transformar en compost
9. Residuos sólidos de fácil comercialización son arrojados y mezclados con el resto de desperdicios, haciendo que estos pierdan su potencial de ser acopiados, recogidos por gestores y posteriormente, reciclados
10. No existe un sistema de recolección, acopio ni promoción, que se encargue de guiar a la población del campus para que recupere residuos sólidos mediante la reducción, re-uso o reciclaje

Determinación del potencial energético

Consumo de energía eléctrica: el consumo de energía eléctrica en los hogares de Cuba se ha incrementado en los últimos cinco años, según los datos disponibles en un 15,63 %, con un incremento promedio anual de 2,96 % y un consumo promedio mensual de 191,1 (kWh/cliente) (ONEI 2022). La Cujae tiene un consumo mensual de energía eléctrica de 301,315 MWh por plan como promedio.

Con los volúmenes de RS recolectados en el campus Cujae durante la investigación, se estima la valorización de los mismos para las distintas tecnologías, obteniéndose como resultados un potencial de generación de electricidad de entre 17,78 y 143,57 MWh de electricidad según la tecnología utilizada y los diferentes escenarios, ver figura 4.

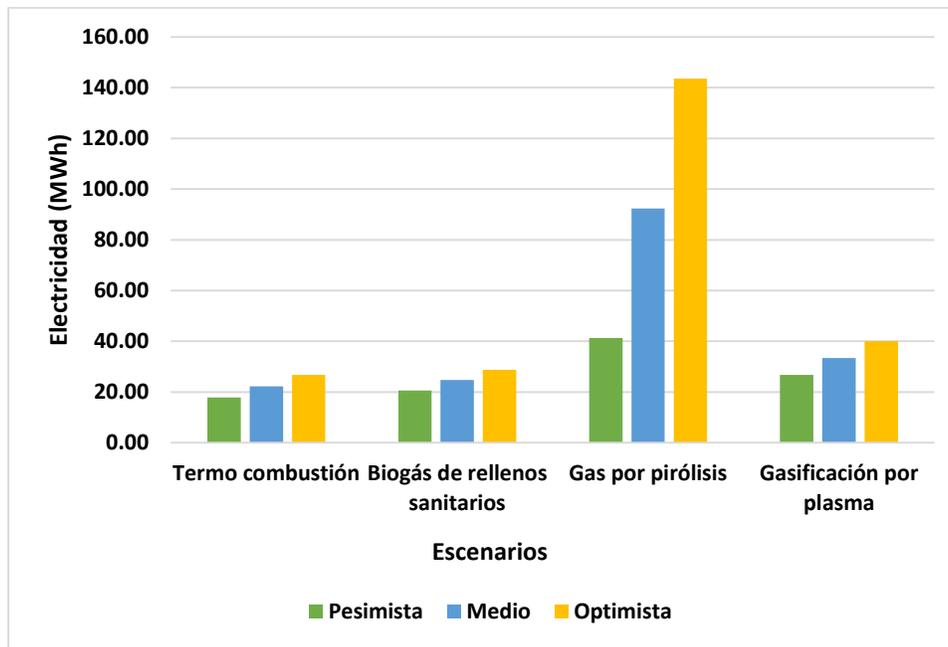


Figura 4 Estimación de la generación de energía eléctrica según las tecnologías de valorización por tonelada de RSU

Como se puede apreciar, según los resultados de este estudio preliminar, la pirólisis teóricamente, ofrece obtener mayor rendimiento energético; sin embargo, es una tecnología costosa según (Tangri 2017). En Cuba se han desarrollado investigaciones sobre la pirólisis de residuos forestales o de arbustos considerados plagas, como el marabú; como recurso renovable de energía, de paja o bagazo de caña, así como de residuos sólidos de naranja.

Para poder tratar los residuos mediante pirólisis, se deben cumplir una serie de requisitos, no obstante, es difícil definir la tipología de los residuos considerados como adecuados o inadecuados, dado que está muy relacionado con el tipo de reactor usado y de las condiciones de operación. Básicamente, se consideran como residuos más aptos: papel, cartón, astillas de madera, residuos de jardín y algunos plásticos seleccionados, por lo que los residuos sólidos generados en el campus Cujae, son una cantera para la utilización de esta tecnología.

Los residuos deben proceder de un sistema selectivo de recogida y/o en su defecto, deben someterse a un sistema de clasificación previo a la planta de pirólisis. No son admisibles los residuos voluminosos, los metales, los materiales de construcción, los residuos peligrosos, vidrio y algunos plásticos, como el PVC, los cuales se requiere triturar, secar y homogeneizar. Ni en la Cujae, ni en La Habana en general, se cuenta con un sistema de recogida y clasificación en origen, causado por la situación económica, la falta de cultura y sensibilidad de la población, lo que, unido a la ausencia de plantas de tratamientos de RSU, hacen que sean depositados en los vertederos, desechos de diversos orígenes, lo que complejiza la aplicación de esta tecnología.

Las ventajas del proceso de pirólisis incluyen:

1. La posibilidad de recuperar fracciones orgánicas, como por ejemplo el metanol
2. La posibilidad de generar electricidad usando motores de gas o turbinas de gas para la generación, en lugar de calderas de vapor
3. Reducir el volumen de los gases de combustión, para reducir el costo de inversión en el tratamiento de gases de combustión

4. Las ventajas de emisión de los gases de combustión conseguidos en este proceso se verán reducidas, cuando se realice un proceso a altas temperaturas como la gasificación o la combustión

Como inconvenientes, se puede decir que:

1. Uso limitado de ciertos residuos
2. Requiere buen control de operación del proceso
3. La tecnología no está ampliamente probada
4. Requiere un mercado para el gas de síntesis
5. Normalmente se utiliza en una etapa posterior de combustión

Análisis económico

Estimación del ahorro económico por la generación de electricidad

El precio actual del barril de petróleo *Brent* del día 9 de diciembre de 2023 (OPEC 2023), es de 9 114,00 CUP (75,95 USD) el barril. El consumo eléctrico de la Cujae representa un gasto de 1 701 759,90 CUP en combustible, mensualmente para el país utilizando la conversión (Autores 2020):

1 MWh = 0,086 tep, 1 tep = 7,2056 bep (barriles equivalentes de petróleo)

Con la utilización de tecnologías para la generación de electricidad a partir del aprovechamiento de RSU, se estima un ahorro económico representativo para Cuba y más en la situación energética actual que atraviesa el país.

En la figura 5, se observa una comparación entre las distintas tecnologías del presente estudio y el ahorro económico que representa. Se puede observar que la pirólisis ofrece una estimación de 810 850 CUP de ahorro mensual, utilizando solamente los residuos sólidos generados en el campus Cujae.

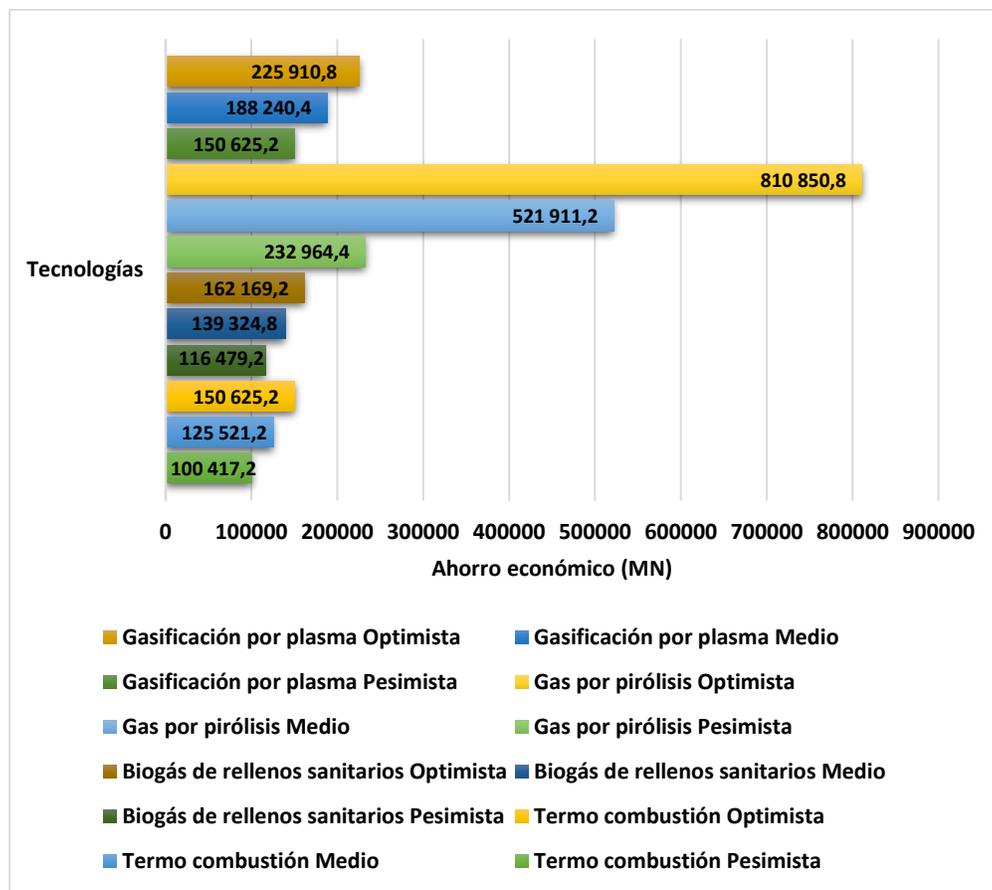


Figura 5 Estimación del ahorro económico en CUP por la generación de electricidad según el tipo de tecnología

Propuesta de la mejor variante para el campus Cujae

Como anteriormente se menciona la tecnología de gas por pirólisis es la más recomendada para el campus Cujae, ya que tiene un alto potencial de valorización por tonelada de residuo sólido. Al ser los residuos más utilizados para esta tecnología: el papel, cartón y residuos de jardín, los predominantes en la Cujae, se destaca esta tecnología como beneficiosa en su uso. El ahorro económico que permite el empleo de esta tecnología, constituye un aporte al desarrollo sostenible que se espera sea alcanzado por todos los países y en este momento, es una respuesta a la imperiosa necesidad del ahorro de combustible al que ha llamado la máxima dirección del país.

Conclusiones

La evaluación preliminar de las potencialidades de los residuos sólidos urbanos existentes en el campus Cujae, así como la valorización de los mismos para las tecnologías estudiadas, permite obtener como resultado, que estos residuos tienen un potencial para la generación de electricidad entre 17,78 MWh y 143,57 MWh, según la tecnología utilizada en los diferentes escenarios. Para el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos del campus Cujae, se propone como mejor variante la tecnología de gas por pirólisis, la cual permite un ahorro mensual de 810 850 CUP.

Referencias bibliográficas

1. Autores, C. d. (1987). Nuestro futuro común - Informe Brundtland. N. U. Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Nueva York.
2. Autores, C. d. (2020). Cap 5. ENERGÍAS NO RENOVABLES.
3. Autores(a), C. d. (2018) La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible una oportunidad para América Latina y el Caribe. Naciones Unidas.
4. Broche, Y. and R. Ramos (2014). "Procedimiento para la gestión de los residuos sólidos generados.
5. Caldera, Y. (2016). "Manejo integral de los residuos sólidos en un núcleo universitario." Impacto científico 11.
6. CEPIS (2005). Procedimientos estadísticos para los estudios de caracterización de los residuos sólidos.
7. CITMA (2017). Anuario Estadístico 2016, Edición 2017, Cuba. O. N. d. E. e. I. ONEI.
8. CITMA (2018). Anuario Estadístico 2017, Edición 2018, Cuba. O. N. d. E. e. I. ONEI.
9. Columbié, J. D. N., et al. (2021). "Evaluación del potencial energético de los residuos sólidos en Santiago de Cuba." Anuario Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales: 90-108.
10. Coracora, M. D. d. (2013). "ESTUDIO DE CARACTERIZACION DE LOS RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES DEL DISTRITO DE CORACORA-AYACUCHO."
11. Cujae (2023). "Página web Cujae. Recursos humanos. Total de trabajadores." from drh.cujae.edu.cu.
12. Flores, C. B. (2009). "La problemática de los desechos sólidos." Economía XXXIV: 121-144.
13. Graziani, P. (2018). Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: Oportunidades en América Latina. Buenos Aires.
14. intecoAstur (2023). "Contenedor 1.000 litros." from <https://www.intecoastur.com/catalogo/contenedor-desechos-1000-litros-reciclaje/>.
15. IRAM29523, N. (2010). Norma IRAM 29.523:2003/2010 Calidad ambiental- Calidad del suelo: Determinacion de la composición de residuos solidos urbanos sin tratamiento previo PRIMERA EDICION 2003-03-10. Cuba.
16. López, J. C. (2015). Obtención de biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos para su inyección a Red.
17. Meadows, D. H., et al. (1972). The Limits to Growth. Nueva York.
18. Millan, T. B. (2014). "Estudio de Factibilidad Técnica y Económica de una Planta de Pirolisis para la Valorización Energética de Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal—Bing ".
19. Nzila, C., et al. (2010). "Biowaste energy potential in Kenya." Renewable energy 35(12): 2698-2704
20. ONEI, O. N. d. E. e. I. (2022). Anuario estadístico de Cuba 2022, Dirección General de Estadística.
21. OPEC (2023). "OPEC December 2023." from https://www.opec.org/opec_web/en/press_room/7081.htm.

22. Quinteros, P. I., et al. (2020). "Modelo multicriterio para la gestión integral de residuos sólidos urbanos en Quevedo – Ecuador." *Revista de Ciencias Sociales* XXVI: 328-352.
23. Rebolledo, A. B. (2009) *Gestión Integral del Residuos Sólidos Municipales*.
24. Reyes, H. P. (2006). "Estudio del potencial energético a partir de los residuos sólidos en algunos distritos del cono norte de Lima Metropolitana."
25. Rosario, J. B. F. d., et al. (2014). "GESTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y SUS IMPACTOS ECONÓMICOS, SOCIALES Y MEDIOAMBIENTALES." Centro Azúcar 41.
26. Salcedo, J. A. (2008). D5231 – 92 Método de prueba estándar para la Determinación de la Composición de Residuos Sólidos Urbanos No Procesados.
27. Silveria, M. L. C. (2019). DETERMINACIÓN DEL APORTE PERCÁPITA DE RESIDUOS SÓLIDOS PELIGROSOS GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD PÚBLICA DE LA CIUDAD DE HUARAZ –ANCASH. FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA. Perú, UNIVERSIDAD NACIONAL “SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”.
28. Soto, M. (2013). Tecnología de incineración o gasificación lo que persigue es generar calor, Obtenido de <https://www.nacion.com/elpais/servicios/tecnologia-de-....>
29. Tangri, N. (2017). "M. wilson,“Gasificación y pirólisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos,” GAIA, SF, CA." *Análisis de Tecnologías de Riesgo*.
30. Trujillo, R. S. (2020). *Solución a la basura: gestión integral de residuos sólidos*, Editorial Nueva.
31. Yassin, L., et al. (2009). "Techno-economic performance of energy-from-waste fluidized bed combustion and gasification processes in the UK context." *Chemical Engineering Journal* 146(3): 315-327.