

Diseño óptimo de la cadena de suministro de producción de pellets a partir de agro-residuos en Querétaro, México

Optimal design of the pellet production supply chain from agro-waste in Querétaro, Mexico

Luis Fernando Monroy-Garduño¹, Dulce María Aguilar-Murguía², Carlos Eduardo Guzmán-Martínez³, Claudia Gutiérrez-Antonio⁴, Sergio Iván Martínez-Guido⁵

Monroy-Garduño, L.F; Aguilar-Murguía, D.M; Guzmán-Martínez, C.E; Gutiérrez-Antonio, C; Martínez-Guido, I. Diseño óptimo de la cadena de suministro de producción de pellets a partir de agro-residuos en Querétaro, México. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, número especial. Diciembre, 2023. Encuentro Iberoamericano en Biomasa y Bioenergía. Pág. 27-34.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7008>

- 1 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México. Correo electrónico: imonroy10@alumnos.uaq.mx
<https://orcid.org/0000-0001-7155-4543>
- 2 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México. Correo electrónico: ing.dumarag-921@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8615-1533>
- 3 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México. Correo electrónico: dcicqcarlos@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3404-2650>
- 4 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México. Correo electrónico: claugtez@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7557-2471>
- 5 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México. Correo electrónico: sergio.martinezg@uaq.mx
<https://orcid.org/0000-0002-0198-9338>

Palabras clave

Biomasa residual; economía circular; optimización matemática.

Resumen

La demanda de energía a nivel global ha incrementado drásticamente debido al crecimiento poblacional. Particularmente, en México se ha tenido un aumento del 209% en el consumo de electricidad a nivel nacional en el período 1990 a 2020, alcanzando los 307.480 TWh [1]. Bajo este tenor, hoy en día es necesario identificar nuevas fuentes energéticas sustentables, con las que sea posible satisfacer las necesidades de una forma económica y eficiente. La biomasa es uno de los componentes más abundantes y disponibles en todo el planeta, por lo que es una pieza clave en la producción de bioenergéticos que permiten promover la economía circular [2]. Específicamente, el uso de biomasa residual de procesos agroindustriales como materia prima de los biocombustibles es una alternativa atractiva con la que es posible visualizar un panorama energético sustentable, al mismo tiempo de promover la gestión integral de estos residuos. Así, en el presente trabajo se plantea el diseño óptimo de la cadena de suministro de producción de pellets a partir de agro-residuos, tomando como caso de estudio el estado de Querétaro en México. Para ello se propuso un modelo de optimización matemática mixto entero lineal el cual fue codificado en GAMS®. Los resultados muestran que es posible satisfacer el 62% de energía en Querétaro usando pellets obtenidos a partir de biomasa agro-residual; además, el uso de estos biocombustibles posibilita una reducción del 20% de emisiones al sustituir fuentes convencionales para la producción de energía por agro-residuos.

Keywords

Biomass waste; circular economy; mathematical optimization.

Abstract

Global energy demand has increased dramatically due to population growth. In Mexico, there has been a 209% increase in electricity consumption at the national level from 1990-2020, reaching 307.480 TWh [1]. In this sense, it is now necessary to identify new sustainable energy sources with which it is possible to meet the needs economically and efficiently. Biomass is one of the most abundant and available components on the planet, so it is a crucial part of the production of bioenergetics that promote the circular economy [2]. Specifically, using residual biomass from agro-industrial processes as a raw material for biofuels is an attractive alternative with which it is possible to visualize a sustainable energy landscape while promoting the integral management of this waste. Thus, this paper proposes the optimal design of the supply chain of pellet production from agro-waste, taking as a case study the state of Querétaro in Mexico. For this purpose, a linear integer mixed mathematical optimization model was proposed, encoded in GAMS. The results show that it is possible to satisfy 62% of energy in Querétaro using pellets obtained from agro-biomass. In addition, these biofuels allow a 20% reduction in emissions by replacing conventional sources for energy production with agro-waste.

Introducción

En México se generan 264.6 millones de toneladas de productos agrícolas, que representan 3% del producto interno bruto. A pesar de su importancia, el sector agrícola es uno de los que ofrecen menor calidad de vida, con un ingreso diario promedio entre 32 y 100 MXN, que representa entre 22% y 70% del salario mínimo diario. Ante esta situación, es evidente la

necesidad de focalizar esfuerzos sobre el aumento de la rentabilidad de este sector, por lo que la revalorización de los residuos generados resulta en una alternativa atractiva para lograr este objetivo. En este sentido, de acuerdo con el Atlas Nacional de Biomasa [3] en México se generan 72,172 toneladas de residuos agrícolas anualmente, de las cuales algunas son utilizadas como alimento para ganado o se queman directamente en equipos térmicos. Sin embargo, un alto porcentaje de ellos son abandonados y/o queman en los campos de cultivo, o enviados a rellenos sanitarios, ocasionando graves problemas ambientales. Por ello, la revalorización de estos residuos permite visualizar un panorama que incluye la generación de nuevos productos, resolver el problema de contaminación, y beneficiar social y económicamente al sector agrícola.

Particularmente, la producción bajo invernaderos forma parte de los procesos productivos agrícolas que más energía requiere; consumo que se traduce entre 20-40% del costo total de este tipo de sistema productivos. Adicionalmente, este tipo de tecnologías productivas también se caracterizan por la generación de altas cantidades de residuos en toda la cadena productiva; con un alto potencial energético, el cual puede ser aprovechable (véase cuadro 1).

Cuadro 1. Generación de residuos agrícolas y su potencial energético [4].

Cultivo	Potencial de residuos (Ton/ha)	Potencial energético (TJ/año)
Arroz	13.772	3,994
Banano	12.272	0.008
Café	3.468	12,420
Caña de palmera	43.442	381
Maíz	4.688	1,186
Palma de aceite	5.228	4,039
Plátano	92.332	859
TOTAL	161.430	22,880

Bajo este contexto, pese a los grandes volúmenes de residuos generados en este tipo de sistemas productivos, hoy en día su aprovechamiento es casi nulo; aún y cuando la composición de éstos se caracterice por compuestos de alto valor como la lignina, hemicelulosa y celulosa principalmente. Compuestos que son altamente atractivos para su uso como materias primas en la producción de biocombustibles, promoviendo la economía circular en los procesos productivos mediante la adopción de estrategias de manejo sustentables.

Por lo tanto, el objetivo de esta propuesta es el diseño y planificación de una cadena de suministro de producción de pellets a partir de residuos agroindustriales. Los cuales pueden usarse como fuente de calor y generación electricidad a diversos procesos productivos, con la meta de reducir la dependencia a los combustibles fósiles.

Materiales y métodos

Para estimar la viabilidad de los residuos agrícolas se llevó a cabo la metodología mostrada por la figura 1, misma que es descrita a continuación:

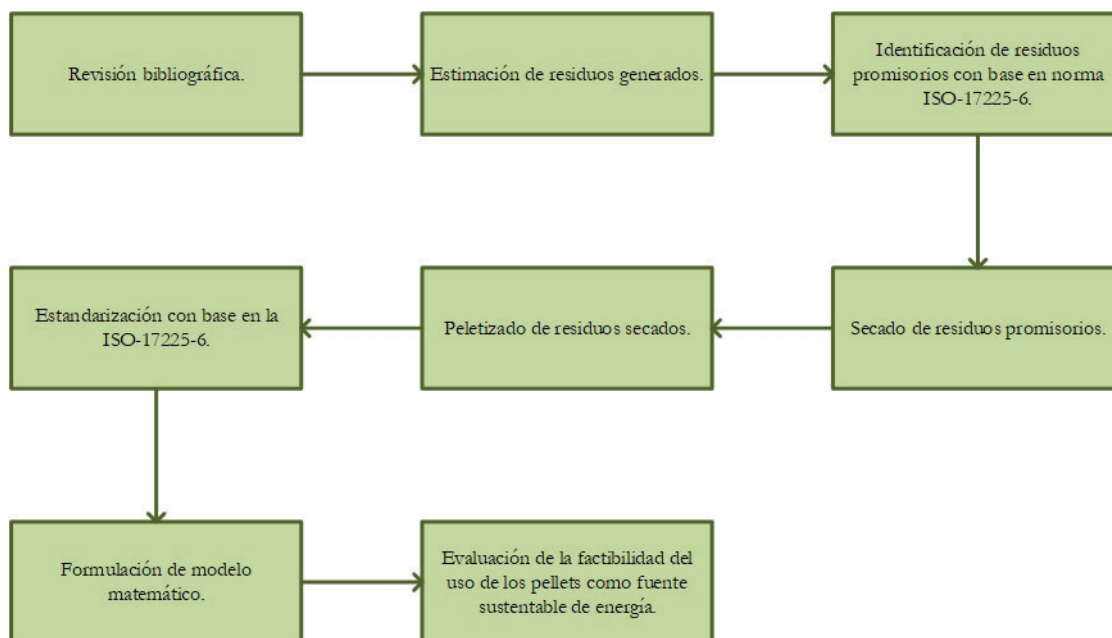


Figura 1. Esquema de trabajo propuesto.

- Revisión bibliográfica, acerca de métodos de revalorización de residuos agroindustriales. Así como de las técnicas implementadas para la producción de pellets generados a partir de otros tipos de materias agrícolas, incluyendo condiciones, aplicaciones y principales resultados.
- Posteriormente se llevó a cabo la estimación de residuos generados a partir de las bases de datos disponibles, teniendo en cuenta a Querétaro como caso de estudio.
- Identificación de residuos promisorios con base a su caracterización, teniendo como base la norma de biocombustibles sólidos “ISO 17225-6” [5]. En la que se incluyen pruebas de: i) Porcentaje de humedad, ii) Potencial calorífico, iii) Contenido de carbono total (C), iv) Contenido de hidrogeno (H), v) Contenido de azufre (S), vi) Material volátil, y vii) Cenizas.
- Se llevó a cabo un secado de los residuos promisorios, para el cual se echó mano de un deshidratador solar.
- Proceso de peletizado. Una vez que se tuvieron los residuos secados, se llevó a cabo una reducción de tamaño, teniendo como base partículas de malla 10/20. Este flujo, se direcciono a un proceso de peletizado.
- Una vez con los pellets manufacturados, fue posible determinar el potencial de los pellets frente a la norma ISO 17225-6 [5].
- Con base en los resultados obtenidos en los puntos tres y seis se realizó un análisis de cada una de las variables mencionadas a evaluar, con el objetivo de obtener una comparativa en base a la ISO 17225-6 y con ello determinar el potencial energético a partir de los residuos agroindustriales.
- A partir de los análisis obtenidos de la sección experimental se diseñó un modelo de optimización matemática mediante el cual fue posible identificar la viabilidad a nivel estatal del uso de los pellets en la generación de electricidad sustentable., el cual se describe a mayor detalle en la siguiente sección.

- Evaluar la factibilidad de uso de residuos agroindustriales como fuente alterna al uso del combustible convencional.

Modelo matemático

La producción de los residuos agroindustriales en los 18 municipios que componen el estado de Querétaro ($BIO_{i,k,t}$) depende del factor de rendimiento en tonelada de residuo por tonelada de cultivo producido ($FB_{i,k,t}$), el cual esta asociado a cada tipo de residuo seleccionado (i), así como del área destina para el cultivo ($AU_{i,k,t}$) (ecuación 1), cabe destacar que la producción de residuos está restringida por la capacidad máxima de cultivo $AT_{i,k,t}$ bajo la condición de no incrementar el impacto ambiental (ecuación 2).

$$BIO_{i,k,t} = AU_{i,k,t} \cdot FB_{i,k,t}, \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (1)$$

$$AU_{i,k,t} \leq AT_{i,k,t} \quad \forall i, k, t \in I, K, T \quad (2)$$

Una vez que los residuos son colectados en los diferentes sitios de cultivo ($BIO_{i,k,t}$) son enviados a las plantas de procesamiento de pellets ($BITRA_{i,k,m,t}$), como se muestra en las ecuaciones 3 y 4, el flujo de residuos agroindustriales enviados ($BITRA_{i,k,m,t}$) a las plantas desde los sitios de producción es igual al flujo recibido en cada una de las plantas de producción de pellets instaladas ($BIOO_{i,m,t}$), el flujo de residuos que se puede recibir en cada planta está restringido por la capacidad ($HC_{i,m}$) máxima de los almacenes en cada planta de producción de pellets (véase ecuación 5).

$$\sum_m BITRA_{i,k,m,t} = BIO_{i,k,t}, \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (3)$$

$$BIOO_{i,m,t} = \sum_k BITRA_{i,k,m,t}, \forall i \in I, m \in M, t \in T \quad (4)$$

$$BIOO_{i,m,t} \leq HC_{i,m}, \forall i \in I, m \in M \quad (5)$$

En la ecuación 6, se muestra el balance para la producción de pellets ($PP_{i,m,t}$), el cual parte de la cantidad de residuos recibidos en la planta ($BIOO_{i,m,t}$) multiplicado por el r rendimiento (YPF_i), en este caso el rendimiento depende del tipo de residuo que se esté procesando. Por otro lado, en las ecuaciones 7 y 8 se muestra el flujo de pellets ($PP_{i,m,t}$) distribuidos, donde el flujo enviado ($PFTR_{i,m,j,t}$) es igual a lo que se recibe en las plantas de producción de energía ($PD_{i,j,t}$). La ecuación 9 se emplea para calcular la cantidad de energía eléctrica ($FE_{j,t}$) que es posible producir a partir de la combustión de los pellets ($PD_{i,j,t}$) así como de la cantidad producida a partir de combustibles fósiles ($FC_{i,j,t}$), en caso de que los primeros no sean suficientes para satisfacer la demanda ($MAXE_{i,j,t}$). En cada caso los flujos de materia combustionada se multiplican por el rendimiento eléctrico (FEP_i and YFF). Adicionalmente, la demanda de electricidad es restringida por el flujo máximo de energía ($FE_{j,t}$) demandado (ecuación 10).

$$PP_{i,m,t} = BIOO_{i,m,t} \cdot YPF_i, \forall i \in I, m \in M, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_j PFTR_{i,m,j,t} = PP_{i,m,t}, \forall i \in I, m \in M, t \in T \quad (7)$$

$$PD_{i,j,t} = \sum_m PFTR_{i,m,j,t}, \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (8)$$

$$FE_{j,t} = \sum_i (FC_{i,j,t} \cdot YFF_i) + \sum_i (PD_{i,j,t} \cdot FEP_i) \forall j \in J, t \in T \quad (9)$$

$$FE_{j,t} \geq \sum_i MAXE_{i,j,t} \forall j \in J, t \in T \quad (10)$$

La ecuación 11, muestra los costos fijos y variables involucrados en la instalación de cada planta de procesamiento, los costos fijos ($VA_{i,m}$) dependen de la existencia o no de cada planta (variable binaria [$YVA_{i,m}$]), mientras que los variables ($VB_{i,m}$) dependen del volumen procesado ($HCI_{i,m}$), la suma de ambos nos da el costo de procesamiento de los pellets ($CAPP_{i,m}$). La ecuación 12 muestra la restricción para la capacidad instalada en cada planta, en este sentido el flujo procesado ($HC_{i,m}$) de residuos no debe exceder a la capacidad de procesamiento ($HCI_{i,m}$). Por otro lado, en la ecuación 13 se tienen los costos de transporte ($TCOS$), incluyendo la distribución de biomasa a las plantas peletizadoras ($BIOCOS_{i,k,m}$), así como los de distribución de pellets a las plantas de poder ($PETCOS_{i,m,j}$), los cuales se obtienen de la multiplicación por el respectivo flujo transportado ($BITRA_{i,k,m,t}$ and $PFTR_{i,m,j,t}$). Los costos generados por el uso de combustible convencional ($COVCOS$) están representados por la ecuación 14, estos involucran el precio unitario ($UCCF_{i,j,t}$) más por el flujo transportado ($FC_{i,j,t}$). Mientras que la ecuación 15 muestra la suma de todos los costos mencionados previamente dando como resultado los costos totales por la generación energía eléctrica ($TOTCOS$).

$$CAPP_{i,m} = VA_{i,m} \cdot YVA_{i,m} + VB_{i,m} \cdot HCI_{i,m}, \forall i \in I, m \in M \quad (11)$$

$$HC_{i,m} \cdot YVA_{i,m} \geq HCI_{i,m}, \forall i \in I, m \in M \quad (12)$$

$$TCOS = \sum_{i,k,m,t} BITRA_{i,k,m,t} \cdot BIOCOS_{i,k,m} + \sum_{i,m,j,t} PFTR_{i,m,j,t} \cdot PETCOS_{i,m,j} \quad (13)$$

$$COVCOS = \sum_{i,j,t} FC_{i,j,t} \cdot UCCF_{i,j,t} \quad (14)$$

$$TOTCOS = TCOS + COVCOS + \sum_{i,m} CAPP_{i,m} \quad (15)$$

La ecuación 16 muestra cómo obtener los salarios del personal ($COSPE_m$), designado por un porcentaje ($PERPEO_m$) a partir del costo capital de la empresa ($CAPP_{i,m}$). En este sentido en la ecuación 17 se muestra cómo obtener el número de empleados ($PEOP_m$) necesarios para la planta a partir del salario calculado ($COSPE_m$) con la ecuación 16, sobre el parámetro de salario asignado por persona ($SALARY_m$).

$$COSPE_m = \sum_i PERPEO_m \cdot CAPP_{i,m}, \forall m \in M \quad (16)$$

$$PEOP_m = \frac{COSPE_m}{SALARY_m}, \forall m \in M \quad (17)$$

Resultados

De acuerdo con [3] para satisfacer el 62% de la demanda eléctrica en Querétaro (utilizando solo combustibles convencionales como fuentes de energía) se liberan 21,597,852 t de CO₂/año. A partir del modelo planteado se tiene entonces que es posible lograr una reducción de 4,783,924 (solución 1) y 1,421,138 (solución 2) t de CO₂/a si se lleva a cabo la revalorización de los agro-residuos. Lo que se traduce en 22,15% menos emisiones liberadas cuando se plantea la maximización del rendimiento económico como función objetivo; y 6,58% menos emisiones cuando se plantea como función objetivo la minimización de estas. Ambos porcentajes comparados con la con la situación actual del estado. Sin embargo, para lograr cualquiera de estas reducciones de emisiones es necesaria la inversión económica, la cual contempla la adquisición de la planta de producción de pellets (revalorización) así como los costos derivados del manejo de esta. La inversión alcanza aproximadamente US\$8,058,179, monto en el que aproximadamente el 80% está dado por el costo de producción; los cuales están constituidos por la instalación de la planta de paletización y los costos de transformación. De esta manera el costo más alto tiene sentido debido a que actualmente no hay ninguna planta de paletización instalada en Querétaro. Y en este sentido se requiere de la instalación de una planta nueva planta para satisfacer el 62% de la demanda nacional de energía eléctrica. Por otro lado, el 20% del dinero total invertido está dado por el costo del transporte y los impuestos añadidos a la nueva actividad económica.

Conclusions

La revisión realizada en este trabajo muestra la factibilidad de convertir residuos agrícolas en pellets combustibles, los cuales son una alternativa para reducir problemas ambientales relacionados al manejo de desechos; además, se revalorizan estos residuos al no sólo ser enterrados o incinerados sin control. El potencial energético reportado por la literatura muestra el uso de este tipo de biomásas como una alternativa promisoría para su uso como fuente de energía alterna, mismo que se puede estimar a partir de los resultados obtenidos mediante la implementación del modelo. Así mismo, los resultados indican que es posible satisfacer un porcentaje representativo del estado de Querétaro a partir de fuentes renovables, lo que contribuye a la reducción de emisiones, generación de empleos, y la mejora social, sin embargo, para que este tipo de propuestas se hagan físicamente posibles es necesario la generación de políticas públicas que generen en primera estancia los mecanismos para llevar a cabo cada etapa, así como la generación de incentivos que motiven socialmente a la mejora continua del proceso en sí. Por otro lado, la metodología propuesta contribuye a la selección de materias que si se consideren como materias viables para la producción de pellets, puesto a que es necesario el uso de materias que conlleven el mínimo esfuerzo, transformación o inversión de energía para poder producir biocombustibles que sean competitivos frente a los convencionales.

Agradmientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT (México) el apoyo para la realización de este trabajo a través de la beca de Estancia Postdoctoral para Sergio Iván Martínez Guido.

Y a la Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T) del Programa CYTED, organizadora del evento EIBB-2022.

Referencias

- [1] International Energy Agency “EIA,” World Oil production, 2021, <http://www.iea.org/fuels-and-technologies/oil>
- [2] P. Pradhan, P. Gadkari, A. Arora, S.M. Mahajani, 2019, Economic feasibility of agro waste pelletization as an energy option in rural India, *Energy Procedia*, 158, 3405-3410
- [3] Secretaría de Energía “SENER”, Atlas Nacional de Biomasa, 2018, <https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-biomasa>
- [4] I. Dupuis, “Estimación de los residuos agrícolas generados en la isla de Tenerife resumen del estudio de GPA S.L. para el cabildo insular de Tenerife (N.o 1)”, Servicio técnico de agricultura y desarrollo rural, 2006, <https://doi.org/10.1145/1067268.1067287>
- [5] ISO, Solid biofuels-fuel specifications and classes- Part 6: Graded non-woody pellets, 2021, <https://www.iso.org/standard/76093.html>