

Cuantificación preliminar del consumo de energía en el proceso de obtención de pélets de rastrojo de sorgo

Preliminary quantification of energy consumption in the sorghum stubble pellets production process

Presentación: 13 y 14 de septiembre de 2023

Valeria Ortmann

CIDEME - Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional San Francisco
viortmann5@gmail.com

Agustina Balangione

CIDEME - Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional San Francisco
agubalangione98@gmail.com

Rocío Gallará

CIDEME - Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional San Francisco
RGallara20@gmail.com

Agostina Quicchi

CIDEME - Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional San Francisco
aquicchi@facultad.sanfrancisco.utn.edu.ar

Diego M. Ferreyra

CIDEME - Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional San Francisco
dferreyra@sanfrancisco.utn.edu.ar

Mariana Bernard

CIDEME - Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional San Francisco
mbernard@sanfrancisco.utn.edu.ar

Resumen

El sorgo azucarado (*Sorghum Saccharatum*, V. M81), se suele sembrar como cortina rompevientos, se adapta a diversas condiciones climáticas y del suelo. Esta especie no se utiliza para fines alimenticios, pero resulta energéticamente interesante. De las 943.151 ha de sorgo sembradas en Argentina en 2021-2022, el 17,60% correspondieron a Córdoba. En este trabajo se estudió la caracterización, acondicionamiento y peletizado del rastrojo de sorgo, (*Sorghum Saccharatum*, V. M81), para la obtención de pélets destinados a generación de energía. Se realizaron determinaciones de humedad, cenizas, materia volátil y materia orgánica. El peletizado se realizó mediante dos procesos, uno a escala laboratorio y otro a escala piloto para cuantificar la energía consumida en ambos. Los resultados sugieren que, al pasar de escala laboratorio a piloto, el consumo energético del proceso se reduce a la cuarta parte, y es posible reducirlo aún más realimentando el proceso con los propios pélets producidos.

Palabras clave: sorgo azucarado, biomasa, escala laboratorio, escala piloto, cuantificación energética.

Abstract

Sweet sorghum (*Sorghum saccharatum*, V. M81), often sown as a windbreak, is adaptable to different climatic and soil conditions. It is a species that is not used for food purposes but is energetically interesting. Of the 943,151 ha of sorghum sown in Argentina in the 2021-2022 period, 17.60% corresponded to Córdoba. This study focused on the characterization, conditioning, and pelletization of sorghum residue (*Sorghum Saccharatum*, V. M81) for the production of biomass pellets. Moisture ash, volatile matter, and organic matter, were determined. Conditioning and pelletizing were carried out at two scales, one at laboratory scale and the other at pilot scale, to quantify the energy consumed in both processes. The results indicate that, by increasing the scale of production from laboratory scale to pilot scale, the unit energy cost of obtaining pellets is significantly reduced.

Keywords: sweet sorghum, biomass, laboratory scale, pilot scale, energy quantification

Introducción

En la actualidad, se está haciendo un gran esfuerzo a nivel global para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. En este contexto, la transición hacia energías renovables es crucial para lograr un sistema energético sostenible, lo que implica transformar la forma en la que producimos, distribuimos y consumimos energía. Una alternativa prometedora es el uso de residuos biomásicos para generar biocombustibles de segunda generación y producir energía. (Manrique, 2022)

En el período 2021-2022 se sembraron alrededor de 943.151 ha de sorgo en Argentina. Es importante destacar que un 17,60% de las hectáreas corresponden a la provincia de Córdoba (MAGyP, 2022) y que este cultivo tiene un impacto positivo en la calidad del suelo.

Existen diferentes variedades de sorgo, como el sorgo azucarado (*Sorghum Saccharatum*, V. M81), que se suele sembrar como cortina rompeviento. Esta variedad puede crecer hasta más de dos metros de altura y produce poca panoja, lo que resulta en una mayor cantidad de biomasa por superficie. Además, el sorgo azucarado tiene la capacidad de adaptarse a diversas condiciones climáticas y del suelo, como sequías o salinidad. (Giorda, 2017)

Este tipo de sorgo no se utiliza para fines alimenticios y no compite con otros cultivos destinados a la alimentación humana. Posee un alto contenido de lignina, lo que lo hace atractivo desde el punto de vista energético, ya que está asociado al poder calorífico superior (PCS). Además, el rastrojo de sorgo tiene una baja densidad y un alto contenido de humedad (65-70%), por lo tanto, es crucial llevar a cabo un proceso de acondicionamiento de la materia prima antes de transformar la biomasa en biocombustible. (Giorda, 2017). El objetivo de este trabajo es cuantificar el consumo energético preliminar para la obtención de pélets de sorgo azucarado, tanto a escala laboratorio como piloto.

Desarrollo

La biomasa elegida para llevar a cabo el presente estudio es el rastrojo de sorgo azucarado (*Sorghum Saccharatum*, variedad. M81), provisto por la EEA Manfredi (Estación Experimental Agropecuaria Manfredi) del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Se lo sometió a dos procesos, uno a escala laboratorio utilizando 1 kg de material, y otro a escala piloto considerando un flujo másico de 200 kg/h. Ambos procesos consisten en el acondicionamiento del sorgo para su posterior peletización. Se realizó el procedimiento a escala laboratorio como paso inicial, para obtener resultados preliminares y evaluar la implementación del proceso a escala piloto.

Tras ser cosechado, se picó en campo utilizando una picadora autopropulsada (Cibus F, Wintersteiger) con la que se consiguió el material en un tamaño de partícula de 18-40 mm. Luego, se almacenó para su posterior procesamiento.

Se inició el trabajo a escala laboratorio, que consistió en secar el material en estufa (Dalvo) a 105 °C durante 2 h. Posteriormente, se redujo su tamaño utilizando un molino de cuchillas (HC-250Y, Arcano) que funciona a altas velocidades de rotación, alcanzando 28.000 rpm. La molienda se realizó durante 5 min. Luego, se llevó a cabo un proceso de tamizado manual con tamices normalizados (Zonytest) de malla #20 y #35 para separar el material según el tamaño de partículas. Antes de continuar con el proceso de densificación para obtener los pélets, se realizaron determinaciones de humedad (ASTM Int, 2013), cenizas (ASTM Int, 2001), material volátil (ASTM Int, 2019) y materia orgánica para caracterizar la materia prima inicial. Se calculó el contenido de lignina (ANSI/ASTM) (Balangione, et al., 2022) y se estimó el PCS utilizando la fórmula de Küçükbayrak, que considera el

contenido de volátiles y cenizas. Además, se determinó el contenido de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y carbono. (García, et al., 2022)

Luego, se procesó el material utilizando una compactadora de pastillas mecanizada que funciona mediante compresión entre dos punzones y una matriz calibrada, que se acciona a través de un balancín y puede ser operada de forma eléctrica o manual. La compresión se lleva a cabo aplicando una presión máxima de 15 kN (Balangione, et al., 2022). Para el proceso de peletizado, se utilizó únicamente el sorgo preacondicionado a diferentes granulometrías, sin agregado de aglutinantes ni aditivos, y se realizó a temperatura y humedad ambiente.

Posteriormente se llevó a cabo el proceso a escala piloto con la finalidad de obtener resultados más cercanos a la realidad industrial; para ello se inició el secado de la pastura en una secadora industrial de tipo *flash dryer* (Meelko), que consiste en un secador piloto de lecho fluido que trabaja con una temperatura de 120 °C. El motor tiene una potencia nominal mecánica de 5,50 kW y el equipo tiene capacidad para procesar 200 kg/h de material, para lo cual requiere 15 kg/h de combustible; en este caso, se utilizó leña de madera de pino. Esta etapa es necesaria para reducir la humedad del material desde un 60% hasta un 10%. Este proceso se llevó a cabo durante 2 horas en etapas sucesivas.

Luego, se ejecutó la molienda del sorgo utilizando un molino de martillo de alta capacidad que trabaja a 2000 rpm, obteniendo como resultado el material en granulometría más fina que la original, lo que permitió su peletización. El motor de este molino tiene una potencia nominal mecánica de 10 CV, equivalente a unos 7,36 kW. A escala piloto, no se tamiza el material resultante de la molienda, ya que para la peletización se utilizó una máquina industrial (Meelko) que trabaja con una potencia nominal mecánica de 7,5 kW, a temperatura y humedad ambiente, y permite la peletización del sorgo en diferentes granulometrías sin agregado de aditivos. El equipo puede procesar hasta 100 kg/h de material.

Para cuantificar el consumo de energía eléctrica, se utiliza un factor de carga para cada equipo. Este factor, involucra la energía consumida en un determinado tiempo dividida por el producto entre la potencia máxima del equipo y el tiempo considerado, es decir, que es importante considerar la potencia que requiere el equipo para funcionar a plena carga, y la capacidad que tiene para procesar el material en un determinado período de tiempo. Para realizar los cálculos se considera una eficiencia del 85% para todos los motores y se aplica la *Ec. 1* para los equipos a escala piloto, obteniendo así el consumo en kWh (WEG, 2022).

A modo de resumen y visualización del procedimiento utilizado, se muestran en las *Fig. 1* y *Fig. 2* los diagramas de flujo con las etapas del proceso, corrientes y energías involucradas a ambas escalas.

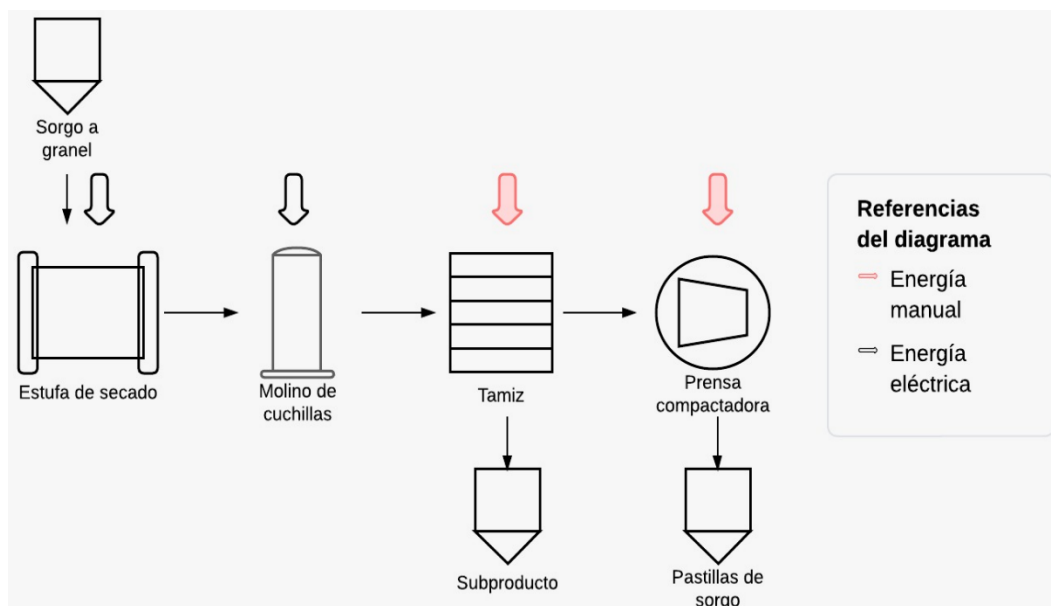


Fig. 1. Diagrama de flujo a escala laboratorio

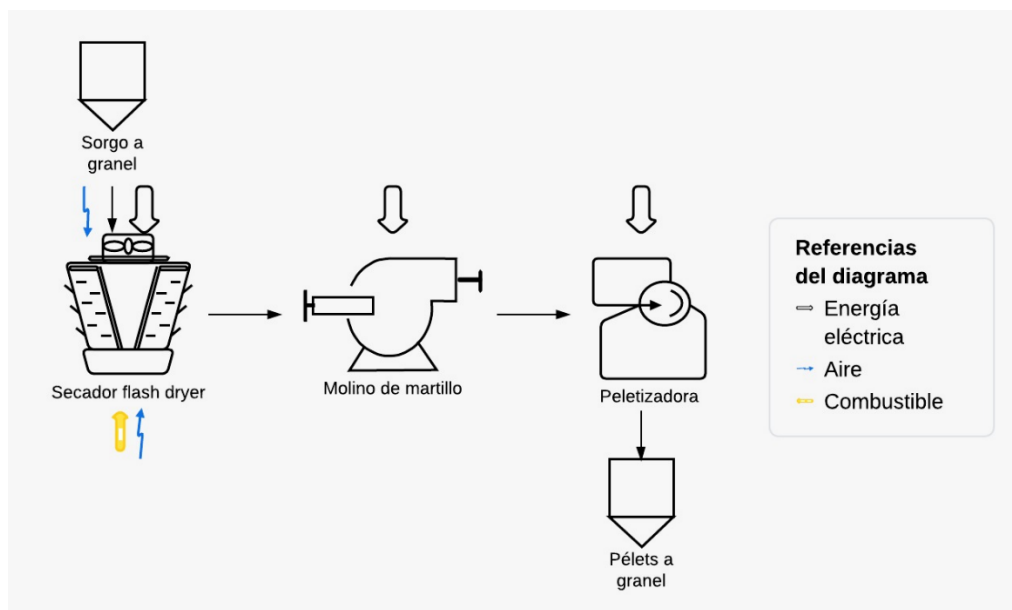


Fig. 2. Diagrama de flujo a escala piloto

En los equipos a escala laboratorio, se contabiliza el consumo eléctrico de la estufa de secado y del molino de cuchillas. Cabe destacar que las etapas de tamizado y peletizado no se consideran para los cálculos debido a que requieren energía manual. Los resultados del consumo eléctrico se obtienen a partir de la Ec. 2. En este caso, no se aplica el cálculo de eficiencia debido a que los valores fueron medidos directamente con un analizador de energía, que considera tanto la energía involucrada durante el proceso de secado como las pérdidas de calor. La Ec. 2 se utiliza para el molino de cuchillas, pero con la consideración de que en una hora se realizan cuatro moliendas, con una capacidad máxima de 0,034 kg por carga.

En ambos casos, se utiliza la Ec. 3 para el cálculo del consumo eléctrico total, que consiste en la suma de los consumos eléctricos de las etapas involucradas en todo el proceso de obtención de pélets.

Es importante resaltar que, en este trabajo no se consideran los cálculos de los equipos que transportan el material entre operaciones del proceso, así como tampoco se incluyen los costos energéticos debido al transporte, almacenamiento y mano de obra.

Para estimar el costo energético, se adopta un valor global de unos \$25,00/kWh al 30 de junio de 2023 que equivale a USD 0,10/kWh en término medio, considerando una cotización del dólar tipo vendedor del Banco de la Nación Argentina:

$$\text{Consumo eléctrico} = \frac{\text{factor de carga} * \text{potencial nominal mecánica}}{\text{eficiencia}} * \text{tiempo} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\text{Consumo eléctrico} = \text{factor de carga} * \text{potencia nominal eléctrica} * \text{tiempo} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\text{Consumo eléctrico TOTAL} = \Sigma \text{consumo eléctrico de las etapas} \quad \text{Ec. 3}$$

Resultados y discusiones

En la Tabla 1, se muestran los resultados de la caracterización del sorgo (*Sorghum Saccharatum*, V. M81).

Tabla 1. Caracterización del sorgo azucarado

Material volátil (%)	Carbón fijo (%)	Humedad (%)	Ceniza (%)	Densidad aparente (kg/m ³)	Análisis elemental (%)				Poder calorífico superior (kJ/kg)
					C	H	O	N	
83,97	2,20	3,19	10,64	190	43,5	5,6	50	0,7	16493

De los resultados obtenidos en la caracterización del sorgo, se entiende que es un cultivo con alto contenido de material volátil y con un PCS similar al del aserrín de *pinus radiata*, cuyo valor es de 16,53 MJ/kg (Fredes Nuñez, 2014), con lo cual aprovecharlo para la generación de pélets es adecuado.

En la Tabla 2, se observan los resultados del consumo eléctrico a escala laboratorio para 1 kg. Para la etapa de secado, se consideran 2 h y, para la de reducción de tamaño, 1 h. Se obtuvieron como resultado las pastillas de sorgo que se observan en la Fig. 3, que poseen una densidad de 0,52 g/cm³.

Tabla 2. Cálculos de consumo por kg a escala laboratorio

Escala laboratorio						
Etapa	Equipo	Factor de carga	Potencia nominal (kW)	Consumo eléctrico (kWh)	Costo en USD	Costo en \$ ARS
Secado	Estufa de laboratorio	0,200	1,770	0,708	0,0708	17,7
Reducción de tamaño	Molino de cuchillas	0,150	1,500	1,65	0,165	41,25
TOTAL				2,358	0,2358	58,95

En la Tabla 3, se exponen los resultados del consumo eléctrico a escala piloto, como así también los factores de carga, potencias nominales y eficiencias de los equipos asociados a cada etapa del proceso. En la etapa de peletizado, el costo económico se duplica dado que la peletizadora tiene capacidad de procesar 100 kg/h y para los cálculos se consideró un flujo másico de 200 kg/h, suponiendo que se usan 2 máquinas idénticas en paralelo. En la Fig. 3 se observan los pélets de sorgo que poseen una densidad de 1,32 g/cm³, que es 2,54 veces la obtenida a escala laboratorio.

Tabla 3. Cálculos de consumo a escala piloto

Escala piloto							
Etapa	Equipo	Factor de carga	Potencia nominal (kW)	Eficiencia	Consumo eléctrico (kWh)	Costo en USD	Costo en \$ ARS
Secado	Secador <i>flash dryer</i>	0,70	5,5	0,85	4,53	0,453	113,25
Reducción de tamaño	Molino martillo	0,70	7,36	0,85	6,06	0,606	151,50
Peletizado	Peletizadora	0,70	7,5	0,85	6,17	1,234	308,5
TOTAL					16,76	2,293	573,25

Nota: Se consideró un flujo másico de 200 kg/h.

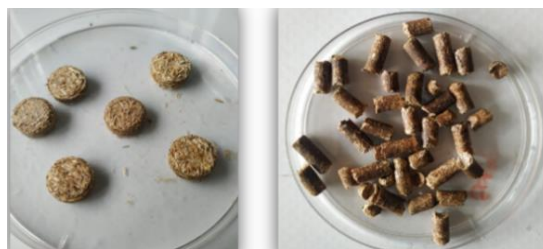


Fig. 3: a) Pastillas de sorgo b) Pélets de sorgo

En la etapa de secado, se incluye el costo del combustible que representa un equivalente energético de 1400 kJ/kg. Se considera un costo de \$160/kg de leña, que en este caso corresponde a un costo total de \$2400 para 15 kg. El costo total a escala laboratorio corresponde solo a consumo eléctrico de 2,36 kWh, y tiene un valor de unos USD 0,25 equivalente a \$60 aproximadamente. En cambio, a escala piloto, además de considerar consumo eléctrico, se contempla el gasto de combustible, con un costo total de unos USD 11,70 equivalente a \$3000 aproximadamente, con un valor de tipo de cambio oficial de \$254 ARS equivalentes a USD 1.

A escala laboratorio, el costo energético es de unos \$60/kg de pélets. Teniendo en cuenta que se vende aproximadamente a \$200/kg de pélets, se observa que el costo energético para producirlo representa el 30% del costo de venta del producto.

Por otro lado, a escala piloto, el costo energético es de unos \$3000 para producir 200 kg de pélets, por lo tanto, se estima un costo de \$15/kg de pélets. De la misma manera, considerando un valor de venta de \$200/kg de pélets, se puede comprobar que el costo energético para producirlo representa un 7,50% del valor de venta del producto. De ese 7,50% un 80,00% corresponde a gastos de combustible necesarios en la etapa de secado, por lo que, el 20% restante representa el gasto debido solo a consumo eléctrico.

Conclusiones

En este trabajo, se evaluó el consumo de energía en el proceso de obtención de pélets de sorgo azucarado, tanto a escala laboratorio como piloto. Los resultados de la caracterización fisicoquímica sugieren que es un material adecuado para generar energía a partir de la obtención de pélets, alcanzando una buena compactación y un PCS semejante al del aserrín de *pinus radiata*. Se observa que la densidad del pélet a escala piloto es 2,54 veces la obtenida para la pastilla a escala laboratorio, lo que confirma que el proceso a escala piloto es más eficiente desde el punto de vista productivo, ya que logra una mayor compactación del material que se reflejaría en menores gastos de transporte y almacenamiento. En la literatura, no se encuentran referencias comparables sobre estas determinaciones realizadas sobre sorgo, lo cual evidencia la utilidad regional del presente trabajo.

En lo económico, como era de esperar, se ratifica que, al aumentar la escala de producción, el costo energético por kg de pélets se reduce a la cuarta parte. Esto demuestra los beneficios de ampliar el proceso de laboratorio a escala piloto y sienta las bases para continuar la investigación en futuros trabajos. Además, es importante resaltar que el costo de combustible en la etapa de secado representa un 80% del valor del costo energético: en lugar de usar leña de pino como combustible en el secador, se podría retroalimentar con pélets cuando el proceso alcance una producción estable, reduciendo aún más el costo energético involucrado en el valor de comercialización.

Agradecimientos

A la EEA Manfredi del INTA por la provisión del material y a UTN por el financiamiento con el proyecto PID ENPPBSF0008448, desarrollado en el grupo de I+D CIDEME, de la Facultad Regional San Francisco de UTN.

Referencias

- Balangione, A., Gallará, R., Ortmann, V., Bernard, M. (2022). "Obtención de pellets híbridos de maíz/espartillo para la generación de energía". 10 ° Congreso de Investigaciones y Desarrollos En Tecnología y Ciencia. IDETEC, UTN Facultad Regional Villa María, 8 al 11 de noviembre, 577-582.
- Fredes Nuñez, N. A. (2014). "Evaluación Técnica y Económica de una Planta de Producción de Combustible Sólido a partir de Biomasa Forestal en la Región de Los Lagos". U de Chile.
- García, L., Quicchi, A., Córdoba, A. M., Taverna, M. E., Bustos, M., Bernard, M., Badano, J. M. (2022). "Gasificación autotérmica a escala banco a partir de biomasa residual proveniente de rastrojo de sorgo". Encuentro Iberoamericano En Biomasa y Bioenergía. Universidad Autónoma de Querétaro, México, 16 al 18 de noviembre
- Giorda, L., Colazo, J. L. *Biomasa Energética de Sorgo en Ubajay (Entre Ríos). INTA Manfredi y el Sorgo: Nuevos Desarrollos.*
- MAGyP, Presidencia de la Nación Argentina «Estimaciones agrícolas», 2021. Recuperado de: <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>
- Manrique, S. M. (2022). "Actualidad, perspectivas y reflexiones en el uso de la biomasa con fines energéticos". *Ciencia e Investigación*, 72.
- WEG. (2022). "W22. Motor eléctrico trifásico. Catálogo Técnico Mercado Latinoamericano". Recuperado de: <https://static.weg.net>