

26. Energía

Estudio del rendimiento energético de mezclas de biomásas sometidas a Carbonización Hidrotérmica

Vallejo, Fidel; Bascuñán, Bastián; Cárcamo, Paulina; Parra, Francisca; Urzúa, Ana; Díaz-Robles, Luis (Profesor Orientador), Cubillos, Francisco (Profesor Orientador)

fidel.vallejo@usach.cl; alonso.diaz.r@usach.cl;

Departamento de Ingeniería Química

Universidad de Santiago de Chile

Resumen

La carbonización hidrotérmica (HTC) es una técnica termoquímica de conversión de biomasa que presenta algunas ventajas: temperatura de operación más baja que otras tecnologías, capacidad de procesar biomásas con alto contenido de humedad y generación de un producto final con características hidrofóbicas. Este estudio evalúa la influencia del uso de aditivos en la HTC mediante un diseño experimental que incluye temperatura, tiempo, presencia de aditivos y composición de la biomasa de alimentación, generando un total de 96 experimentos. Se utilizó prensado de oliva, cáscaras de avena, aserrín de pino radiata y afrecho de raps. La HTC permitió obtener un producto sólido, con mayor poder calorífico que su biomasa de origen. La tasa de densificación energética depende la biomasa y del proceso utilizado, a 175 °C se obtuvo una menor densificación que a 225 °C, 1,06 y 1,23, respectivamente. El aumento del tiempo de 30 a 60 min no demostró ser un parámetro significativo para este estudio. La denominada 'parte reactiva' de la biomasa, que corresponde a la suma de la hemicelulosa y los extractivos acuosos, permite explicar en gran medida los resultados obtenidos. En la oliva (50 % de parte reactiva) y los raps (47 %) se generó un menor rendimiento másico que las mezclas basadas en aserrín (28 %), ya que existe mayor degradación y solubilización en el medio acuoso. El contenido de cenizas más alto de la oliva y la avena, ambos residuos agrícolas, debe ser tenido en cuenta ya que las cenizas forman una parte que no reacciona dentro del proceso HTC y que disminuye el poder calorífico. En general, los rendimientos energéticos son de 75 % a 175 °C y 70 % a 225 °C. El uso de cloruro de magnesio actúa como catalizador en la descomposición de la celulosa, pero genera un contenido mayor de cenizas.

Palabras clave: HTC, aditivos, biomasa agrícola, pino radiata, eficiencia energética

Introducción

La actual coyuntura energética mundial hace que la búsqueda de nuevas fuentes de energía se realice con mayor profundidad y rapidez. Los pronósticos no son alentadores, para la mitad de este siglo las reservas de combustibles fósiles estarán próximas a agotarse, lo cual genera la posibilidad de que energías limpias y renovables entren en el escenario como actores principales (McKendry, 2002a, 2002b; Tekin, Karagöz, & Bektaş, 2014). Una de estas alternativas constituye la carbonización hidrotérmica (HTC), que es un proceso de densificación energética de la biomasa cruda. Las principales ventajas del este método son: la temperatura relativamente baja que se requiere comparadas con otras técnicas de conversión de desechos orgánicos y su capacidad de trabajar con biomasa que presentan alto contenido de humedad (Funke & Ziegler, 2010; Libra et al., 2011). Por otra parte, apenas en la última década se ha empezado a estudiar la HTC con la finalidad de obtener un producto que sea rentable a escala industrial, sea como combustible o como precursor de otras sustancias. Debido a esto, se necesita desarrollar estudios que brinden conocimientos sobre el comportamiento de la biomasa bajo distintas condiciones de operación del proceso, pero sobre todo se debe evaluar

su rendimiento energético frente a la presencia de aditivos que podrían mejorar su carbonización, y su grado de interacción formando partes en mezclas con otras biomasa. Esto último para compensar el hecho de que la biomasa presenta una composición en extremo variable y una disponibilidad estacional y geográfica que es un factor clave en su análisis (Jung & Kruse, 2017).

Este estudio plantea un análisis exhaustivo de la influencia del tiempo y temperatura de reacción sobre mezclas de biomasa chilena, con una caracterización completa antes y después del proceso, para poder establecer conclusiones que definan líneas de investigación a seguir en el futuro, con la finalidad de crear prototipos que sean rentables desde el punto de vista energético y ambiental.

Objetivos

1. Estudiar el efecto de la adición de cloruro de magnesio y ácido peracético, la temperatura y el tiempo de reacción en la carbonización hidrotérmica para distintas mezclas de biomasa.
2. Caracterizar las biomasa y las mezclas a estudiar, determinando densidad másica, poder calorífico superior y cantidad de cenizas,

tanto para biomasa cruda y carbonizada.

3. Determinar el efecto de la alimentación, temperatura y tiempo de residencia sobre los parámetros tales como poder calorífico superior y rendimiento másico para las mezclas de biomasa carbonizadas sin aditivo.
4. Determinar el efecto de la adición de cloruro de magnesio y ácido peracético de forma individual sobre parámetros como poder calorífico y rendimiento másico en la biomasa carbonizada hidrotérmicamente.

Materiales y Métodos

Materiales

Reactor

La carbonización hidrotérmica se llevó a cabo en el Reactor Parr Modelo 4551, que se observa en la Figura 1. Este reactor consta de un tanque con un volumen de 4 L, un controlador PID que controla la presión dentro del reactor. En HTC se requiere que, al menos, la presión dentro del sistema sea superior a la correspondiente presión de vapor del agua a la temperatura medida por una termocupla colocada en la pared del tanque. El ingreso y salida de agua se realiza por un sistema de válvulas

mariposa. La relación usual en este tipo de condiciones es 1:12 entre la biomasa y el agua, respectivamente.



Fig 1. Reactor "Parr"

La humedad se determinó mediante el método gravimétrico, en una estufa MEMMERT Basic UNB 400 y las cenizas se determinaron con un horno Carbolite AAF 1100. Ambos equipos se indican en la Figura 2.



Fig 2. Estufa y horno de laboratorio

Métodos

Caracterización de la biomasa cruda

Las pruebas realizadas a la biomasa cruda son: 1) determinación de humedad, 2) densidad, 3) porcentaje de cenizas (UNE-EN 14775:2010), 4) granulometría y 5) poder calorífico superior (UNE-EN

14918:2011). El diseño experimental descrito en la Tabla 1, considera como variables principales dentro de este estudio la temperatura, el tiempo de residencia de la biomasa dentro del reactor, las mezclas de biomasa consideradas y la presencia de aditivos. Las letras P, S y bs denotan biomasa principal, biomasa secundaria y biomasa seca, respectivamente. La cantidad de aditivos fue determinada por anteriores estudios realizados en el Depto de Ing. Química de la Universidad.

Tabla 1. Diseño experimental

Temperatura	175 °C
	225 °C
Tiempo de residencia	30 min
	60 min
Mezcla de biomasa	P (70 %) + S (30 %)
Presencia de aditivos	-----
	1 g MgCl ₂ / g de bs
	1 mL ác. Peracético (15 % p/p) / g de bs

Se realizaron ensayos en el reactor sobre 8 mezclas de biomasa (P: 70% - S:30 %), generando en total 96 corridas experimentales, cada una de ellas con su réplica con la finalidad de garantizar la reproducibilidad de los ensayos. En cada experimento se determinó el rendimiento másico (MY), el poder calorífico del hydrochar obtenido (HHV), porcentaje de cenizas, tasa de densificación energética (EDR) y rendimiento energético (EY). Las

ecuaciones 1 – 3 indican el cálculo de estas variables.

$$MY = \frac{\text{Masa final hydrochar}}{\text{Masa de biomasa cruda seca}} * 100\% \quad (1)$$

$$EDR = \frac{HHV \text{ hydrochar}}{HHV \text{ biomasa cruda}} \quad (2)$$

$$EY = MY \times EDR \quad (3)$$

La elección de tiempos y temperaturas de reacción fue en base a literatura (Li, 2017; Li, Flora, Caicedo, & Berge, 2015). La biomasa presenta una disponibilidad que depende en alto grado de su ubicación geográfica y de la temporada del año de su recolección, por lo cual se evalúan las mezclas en proporción 70-30 para conocer si es posible la obtención de hydrochar de similares características.

Resultados y Discusión

Rendimiento másico

La caracterización de las cuatro biomasa que se van a utilizar en este estudio, se indica en la Tabla 2. Existen diferencias notorias entre ellas, principalmente en el contenido de cenizas, siendo el prensado de oliva la que mayor cantidad presenta con 11,9 % (p/p), mientras que el aserrín tiene apenas un 0,21 %. Por otra parte, la oliva y la avena presentan menor cantidad de lignina, que suele ser el constituyente que menor reactividad presenta durante el proceso HTC (Libra et al., 2011; Reza et al., 2013), aunque es el que mayor aporta al poder calorífico debido a su mayor

contenido de carbono. Por esta razón, la avena presenta el menor contenido de lignina y el PCS más bajo de las 4 biomásas, mientras que los raps presentan un 36,3 % de lignina, y el PCS más alto del grupo.

Tabla 2. Caracterización de biomásas crudas

	AS	AV	RPS	OLV
ρ_{ap} [kg/m³]	156	347	211	450
ρ_{real} [kg/m³]	782	1360	2270	591
Humedad (%)	7,443	7,353	7,263	8,203
Cenizas (%)	0,21	4,44	6,25	11,89
Lignina (%)	30	12,9	36,3	14,2
Celulosa (%)	42	37,6	10,3	24,1
Hemicelulosa (%)	25	23,3	35,3	11
AE (%)	2,79	21,76	11,85	38,81
HHV [MJ/kg]	20,11	18,66	21,34	20,57
LHV [MJ/kg]	18,58	17,06	19,8	19,52
C (%)	51,911	46,771	51,682	49,268
H (%)	6,898	7,25	6,967	4,592
N (%)	0,065	0,49	4,973	1,925
O (%)	40,815	40,767	29,428	31,69

La Tabla 3 indica la caracterización de las mezclas de biomásas crudas a través del poder calorífico superior (HHV), las cenizas presentes (Ash) y su humedad (H).

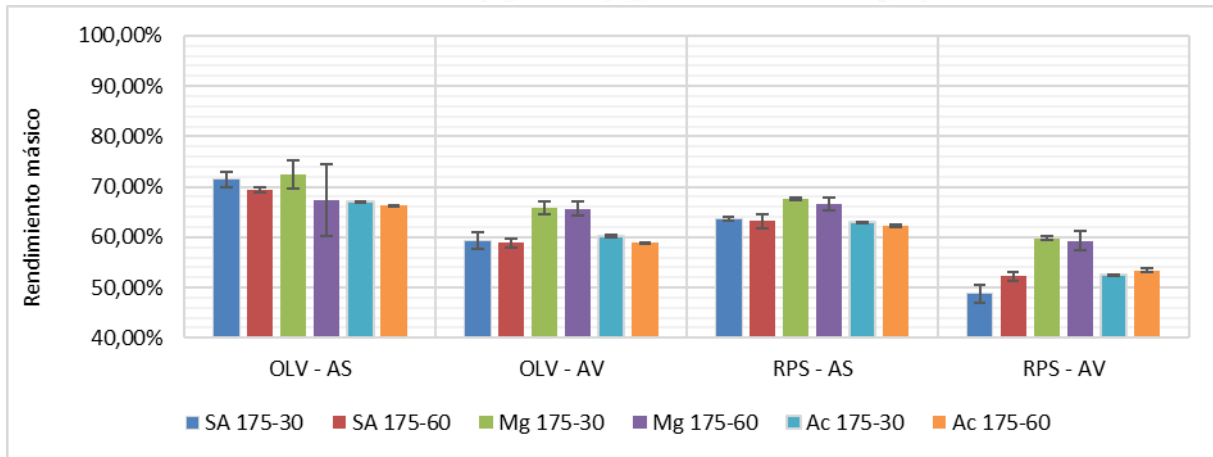
Tabla 3. Caracterización de mezclas de biomasa cruda

Mezclas de biomasa	HHV MJ kg	Ash [%]	H [%]
Olivo (70%)-Aserrín (30%) OLV-AS	21,5	2,61	20,4
Olivo (70%)-C. Avena (30%) OLV-AV	20,8	0,37	21,6
Raps (70%)-Aserrín (30%) RPS - AS	20,7	4,67	11,5
Raps (70%)-C. avena (30%) RPS - AV	20,2	5,67	12,8
C. Avena (70%)-Aserrín (30%) AV - AS	19,5	3,17	13,6
C. Avena (70%)-Raps (30%) AV - RPS	19,6	5,00	14,0
Aserrín (70%)-Raps (30%) AS-RPS	20,5	1,56	11,0
Aserrín (70%)-Olivo (30%) AS-OLV	20,9	1,83	14,8

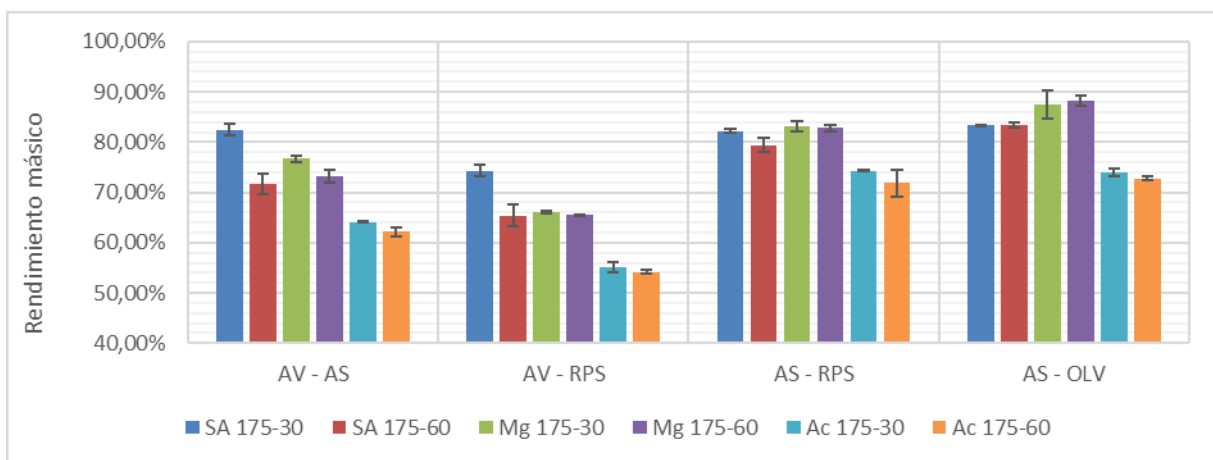
Esta caracterización adicional es de suma importancia, ya que el valor del poder calorífico de las biomásas en mezcla no corresponde a una relación lineal con respecto a sus valores individuales. La variación del rendimiento másico debido a los aditivos se indica en las Figuras 3 y 4, que muestra los resultados obtenidos agrupados por mezcla de biomásas y por temperatura de reacción. Sin aditivos, y a 175 °C y 30 min (175-30, para abreviar), el promedio del MY es de 70,7 %, siendo el valor más alto la mezcla AV-AS con 82,5 % y la menor 48,8 % para RPS – AV. A 175-60, el promedio es 68 %, la variación más grande corresponde a las mezclas AV-AS y AV-RPS, con 10 y 9 %, respectivamente.

respectivamente. A 225-30 y 225-60, el promedio es 59,4 % y 58,9 %, respectivamente. Las mezclas AV-AS y AV-RPS siguen manteniendo la mayor variación al subir la temperatura. De estos valores se puede concluir que la temperatura presenta una mayor influencia que el tiempo de reacción, ya que los valores promedio del MY al pasar de 30 a 60 min no cambian de manera apreciable. Lo cual concuerda con resultados de otros autores, e. g. (Lynam, Toufiq Reza, Yan, Vásquez, & Coronella, 2015). La adición de aditivos presenta una variada influencia, así, a 175 °C, la variación del rendimiento másico en las mezclas OLV-AS y RPS-AS no es significativo con la adición de MgCl₂ y ácido peracético. En el caso de las mezclas OLV-AV, RPS-AV y AS-OLV se nota que el ácido peracético genera un mayor efecto en la disminución del rendimiento másico. Las biomásas están conformadas por celulosa, cenizas, lignina, hemicelulosa y los extractivos acuosos (AE), estos dos últimos son los que reaccionan en primer lugar y a temperaturas menores a 180 °C (Kruse, Funke, & Titirici, 2013; Libra et al., 2011), por lo cual generan un menor rendimiento másico. En la Tabla 2 se indica la proporción de AE para cada biomasa. El

contenido de hemicelulosa + AE, que conforman lo que se suele denominar la 'parte reactiva' de la biomasa es alto para la avena (45%), los raps (47%) y la oliva (50%) (Lynam et al., 2015). Esto explica, por ejemplo, que el menor rendimiento másico se obtenga en la mezcla RPS-AV, mientras que los mayores valores se observen en las mezclas que tienen 70 % de aserrín, que presenta solo un 28 % de parte reactiva. Además, se debe tener en cuenta el estado de agregación de los aditivos, el cloruro de magnesio es un sólido lo cual no brinde el efecto deseado de la misma manera que el ácido peracético. Por otro lado, las desviaciones estándar se indican en cada barra de resultados, y en general son valores bajos, apenas un 1 % en promedio, lo cual permite concluir que los resultados son reproducibles. Con el aumento de temperatura a 225 °C, se ingresa en una región donde los estudios realizados en HTC indican que, adicional a la degradación de la hemicelulosa y de los AE, la celulosa ha empezado a descomponerse en azúcares elementales (Basso, Patuzzi, Castello, Baratieri, & Fiori, 2014; Tekin et al., 2014). Debido a esto, es esperado un menor rendimiento energético.



(a) MY a 175 °C sin aditivos, con MgCl₂ y con ác. peracético



(b) MY a 175 °C sin aditivos, con MgCl₂ y con ác. peracético

Figura 3. MY en mezclas de biomasa a 175 °C, sin aditivos, con MgCl₂ y ác. peracético

La mezcla RPS-AV es la que presenta el menor MY (46 %, en promedio). Por otro lado, las mezclas OLV-AS, AS-RPS y AS-OLV, sin aditivos, presentan porcentajes cercanos al 70 %, en parte debido a lo que ya explicado con anterioridad: el bajo porcentaje reactivo del aserrín y por el elevado contenido de cenizas de la oliva. Para estas mezclas, la presencia de aditivos mejora notablemente la reacción HTC, por lo cual el rendimiento másico presenta una disminución más marcada.

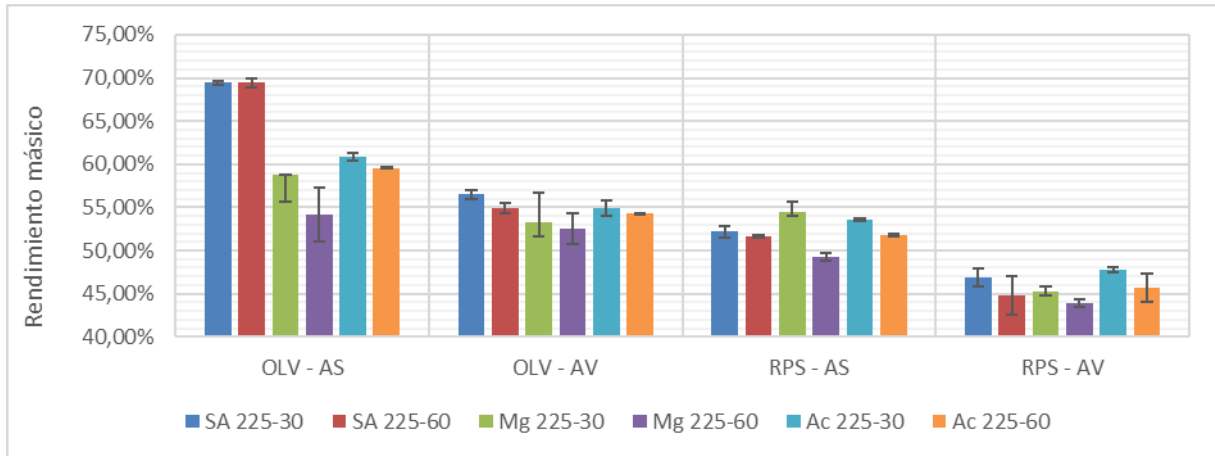
Se explica porque el cloruro de magnesio actúa como un catalizador de la reacción de la celulosa, lo cual no ocurría a 175 °C debido a que no es temperatura suficiente para iniciar la degradación de la celulosa. Finalmente, existen mezclas como RPS-AV y OLV-AV, donde no se distingue ningún aporte de los aditivos, ni a 175 °C ni a 225 °C. RPS y OLV no tienen en común ninguna característica importante, incluso su porcentaje de parte reactiva es la mayor, pero su contenido de cenizas

también es muy superior al de las otras biomazas, lo cual podría actuar como un inhibidor de la acción de los aditivos.

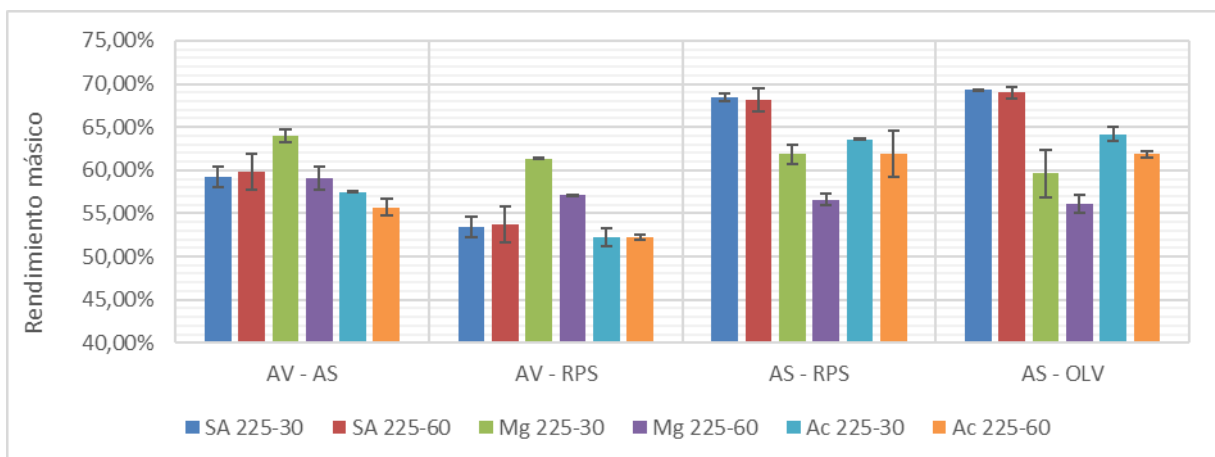
Rendimiento energético

En cuanto al rendimiento energético, las Figuras 5 y 6 indican los resultados obtenidos para las 8 mezclas, de manera similar al análisis del apartado anterior. El rendimiento energético, que es la variable más importante para la evaluación de factibilidad del proceso, representa la relación entre el rendimiento másico y la

densificación energética del hydrochar. Cuando se aumenta la temperatura y/o el tiempo de reacción se consigue, en la mayoría de los casos, que la biomasa se degrade aún más. Esto produce que el rendimiento másico sea menor, y que el poder calorífico del hydrochar, es decir su tasa de densificación energética sea mayor, por lo tanto, el rendimiento energético (EY) permite establecer un compromiso en las condiciones de operación que optimice el proceso.



(a) MY a 225 °C sin aditivos, con MgCl₂ y con ác. Peracético



(b) MY a 225 °C sin aditivos, con MgCl₂ y con ác. peracético

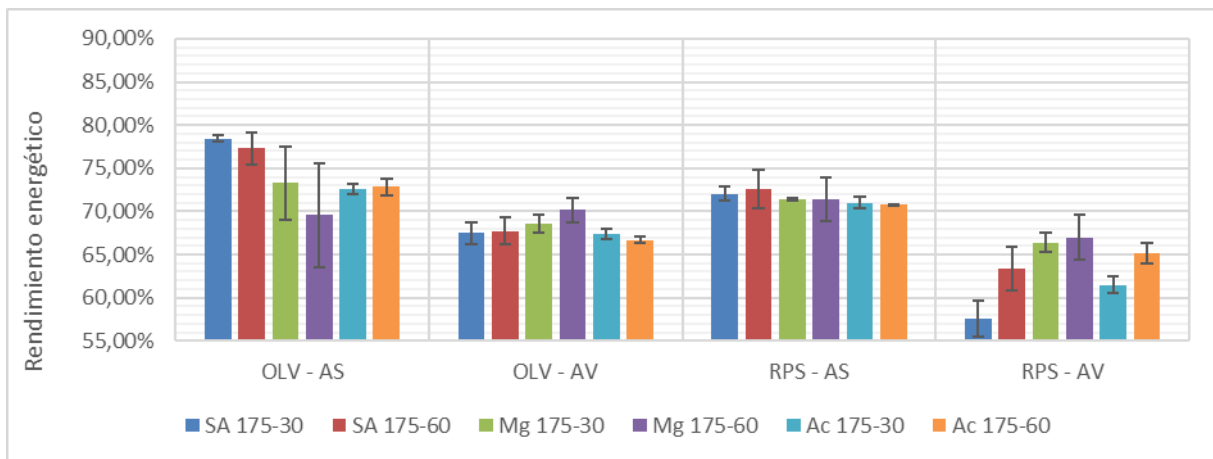
Figura 4. MY en mezclas de biomasa a 225 °C, sin aditivos, con MgCl₂ y ác. Peracético

La Figura 5 (a) indica que, a 175 °C, las mezclas OLV-AV y RPS-AS presentan resultados similares sin aditivos y cuando se adiciona MgCl₂ y ác. Peracético. Los valores del EY son 68 % y 71 %, respectivamente. Para el caso de la mezcla OLV-AS, sin aditivos se logra la máxima EY (76%). La mezcla RPS-AV presenta un EY de 66 % con la adición de cloruro de magnesio.

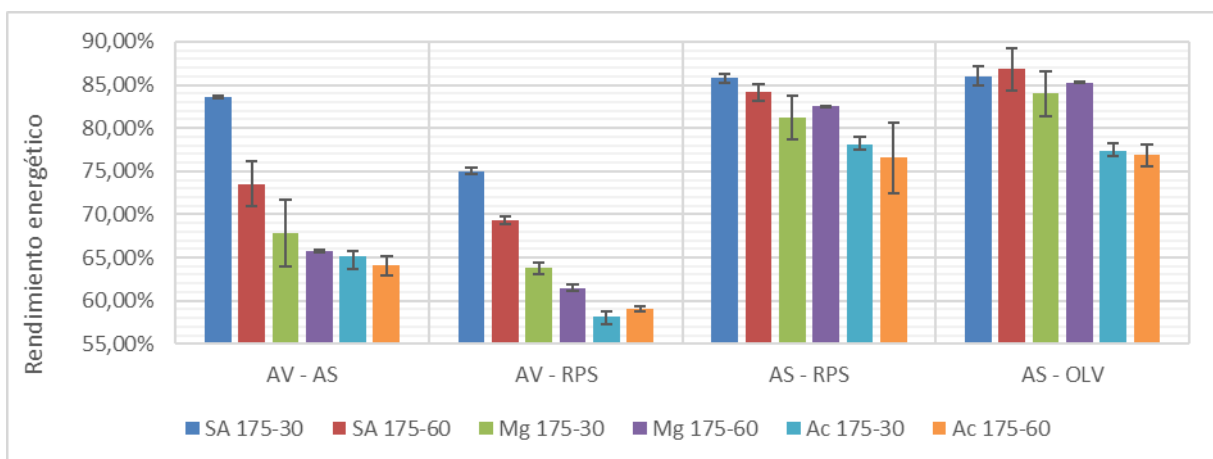
El ácido no representa mejora alguna con respecto a no poner aditivos en este caso.

La figura 5 (b) muestra que para las mezclas de aserrín la adición del cloruro de magnesio no mejora el EY, mientras que colocar ácido perjudica esta variable.

Por otra parte, las mezclas de avena presentan una caída abrupta en los valores de EY al subir el tiempo de reacción y los aditivos tampoco permiten compensar esta situación ya que estos valores de EY se deben a los menores MY observados y a que la EDR no logra compensar esta diferencia.



(a) EY a 175 °C sin aditivos, con MgCl₂ y con ác. Peracético



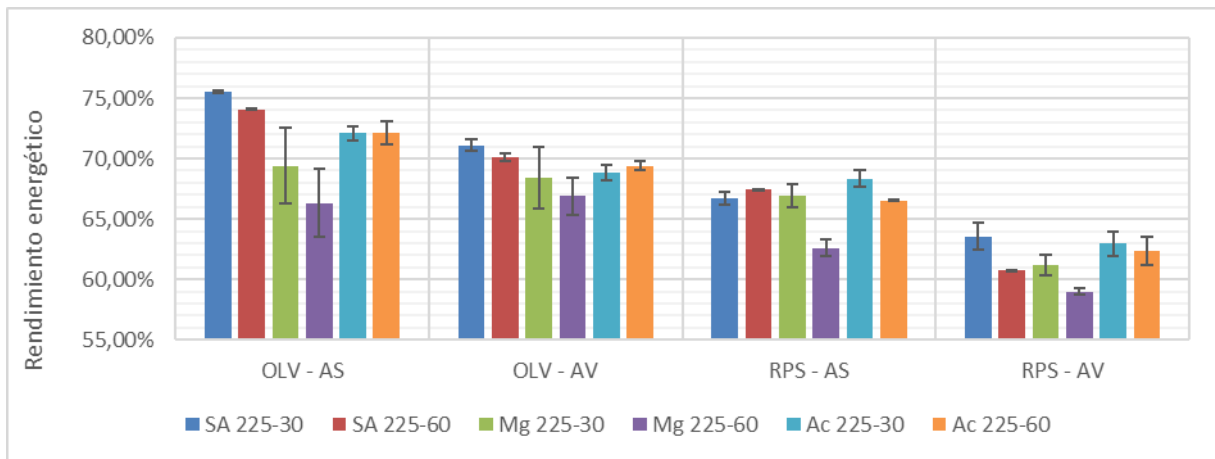
(b) EY a 175 °C sin aditivos, con MgCl₂ y con ác. Peracético

Figura 5. EY en mezclas de biomasa a 175 °C, sin aditivos, con MgCl₂ y ác. Peracético

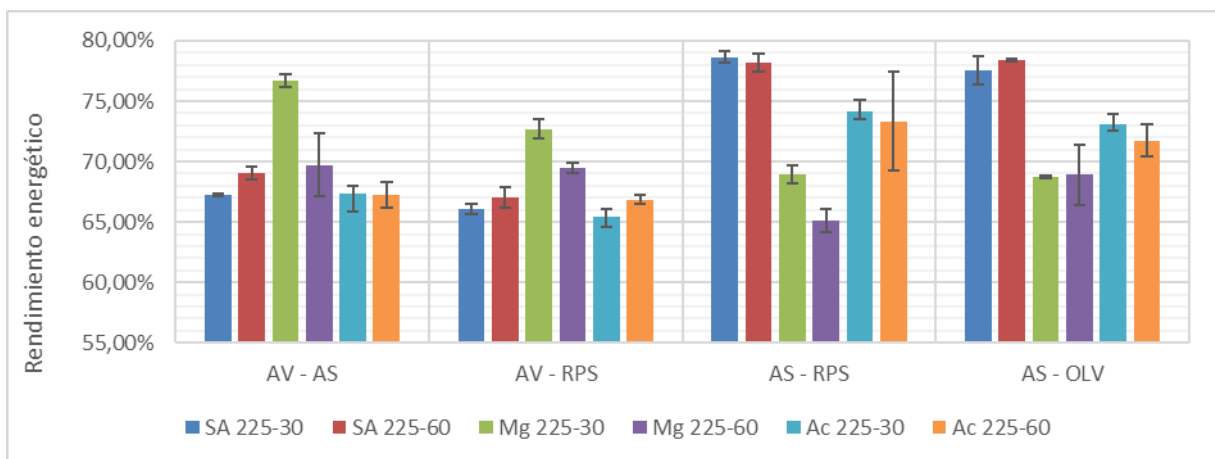
Haciendo un análisis global para esta temperatura, se observa que las mezclas OLV-AS, AV-AS, AS-RPS y AS-OLV tienen los valores más altos de EY a 175-30 y sin aditivos. Los aditivos no ayudan en ningún caso a mejorar el valor de esta variable y, en algunas mezclas provocan un descenso marcado.

Estos resultados se pueden explicar desde dos aristas 1) la parte reactiva de la biomasa, que para la OLV es del 50 %, influye en los mejores resultados

observados y 2) a 175 °C no se degrada la celulosa por lo cual las biomásas presentan un poder calorífico muy similar al original. Debido a esto, la EY responde en mayor medida al comportamiento del rendimiento másico. La Figura 6, indica el comportamiento energético de las mezclas de biomasa a 225 °C. Para las mezclas RPS-AS y OLV-AV no es conveniente el uso de aditivos, puesto que se obtienen valores similares, 66 % y 69 %, respectivamente.



(a) EY a 225 °C sin aditivos, con MgCl₂ y con ácido Peracético



(b) EY a 225 °C sin aditivos, con MgCl₂ y con ácido Peracético

Figura 6. EY en mezclas de biomasa a 225 °C, sin aditivos, con MgCl₂ y ácido Peracético

Al igual que la temperatura anterior, las mezclas que presentan mayores valores de EY son OLV-AS, AS-RPS y AS-OLV. La mezcla AV-AS a 225-30 y con cloruro de magnesio presenta una EY de 77 %, casi similar a las mezclas de aserrín sin aditivo, siendo el mejor resultado obtenido en este estudio. Para los demás casos, no es conveniente el uso de aditivos, puesto que no se logra una mejora en la eficiencia. La explicación nuevamente pasa porque a esta temperatura, el rendimiento másico marca la disminución del rendimiento energético en mayor medida que la densificación energética que se puede obtener. Como se puede observar, en la mayoría de mezclas el EY se mantiene constante al aumentar el tiempo, e incluso en el caso de RPS-AV disminuye su valor. En el caso de los raps y del aserrín el contenido de lignina es superior al 30 %, comparado con la avena y la oliva que tienen 13 y 14 %, respectivamente. Esto implica que en el rango de temperatura del presente estudio no puede obtener una degradación total de la celulosa, lo cual no permite aumentar el poder calorífico por la disminución de la cantidad de oxígeno presente en el hydrochar final. Es importante constatar que el aumento en el tiempo no representa un parámetro significativo en la mayoría de mezclas, dato muy importante para optimizar la energía que requiere el proceso. Esto

sumado a que los aditivos no lograron mejorar apreciablemente el rendimiento energético indica que se debe estudiar con mayor profundidad la temperatura de reacción de la HTC.

Conclusiones

- La carbonización hidrotérmica permite obtener un producto sólido, con mayor poder calorífico que su biomasa de origen. La tasa de densificación energética depende la biomasa y del proceso utilizado, a 175 °C se obtiene una menor densificación que a 225 °C, debido a que la celulosa no ha empezado a degradarse y solubilizarse formando azúcares elementales. El aumento del tiempo no demostró ser un parámetro significativo para este estudio.
- La denominada 'parte reactiva' de la biomasa permite explicar muchos de los resultados obtenidos. En biomasas como la oliva (50 % de parte reactiva) y los raps (47 %) generan un menor rendimiento másico que las mezclas basadas en aserrín (28 %), ya que existe mayor degradación y solubilización en el medio acuoso. El contenido de cenizas más alto de la oliva y la avena, ambos residuos agrícolas,

debe ser tenido en cuenta ya que las cenizas forman una parte que no reacciona dentro del proceso HTC y que disminuye el poder calorífico.

- En general, el aumento del tiempo de 30 a 60 min, manteniendo la temperatura constante no reportó una mejora significativa en el rendimiento energético del proceso. Este dato es importante para futuros desarrollos en plantas piloto. La temperatura es, sin lugar a duda, la principal variable que se debe analizar en un proceso hidrotérmico.
- Los aditivos, cloruro de magnesio a 1 g/g bs y ácido peracético a 1 mL7g bs, influyen significativamente en el rendimiento másico. Debido a que entre 175 y 225 °C el EY está determinado en mayor medida por el MY, no se justifica el uso de aditivos para aumentar el rendimiento energético. Incluso en el caso del cloruro de magnesio se obtuvieron mayor cantidad de cenizas.

Bibliografía

1. Basso, D., Patuzzi, F., Castello, D., Baratieri, M., & Fiori, L. (2014). Modeling the reaction kinetics during hydrothermal carbonization of waste

biomass. *22nd European Biomass Conference & Exhibition*, (July), 1269–1273.

<https://doi.org/10.5071/22ndEUBCE2014-3DV.1.1>

2. Funke, A., & Ziegler, F. (2010). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanism for process engineering. *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, 4, 160–177. <https://doi.org/10.1002/bbb.198>
3. Jung, D., & Kruse, A. (2017). Evaluation of Arrhenius-type overall kinetic equations for hydrothermal carbonization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 127(August), 286–291. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.07.023>
4. Kruse, A., Funke, A., & Titirici, M.-M. (2013). Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials. *Current Opinion in Chemical Biology*, 17(3), 515–521. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.05.004>
5. Li, L. (2017). *Investigating the Feedstock Properties and Process Conditions Influencing the Characteristics of Products Generated from the Hydrothermal Carbonization of Organic Feedstocks*. University of South Carolina. Retrieved from <http://scholarcommons.sc.edu/etd>
6. Li, L., Flora, J. R. V., Caicedo, J. M., &

- Berge, N. D. (2015). Investigating the role of feedstock properties and process conditions on products formed during the hydrothermal carbonization of organics using regression techniques. *Bioresource Technology*, 187, 263–274.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.054>
7. Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., ... Emmerich, K.-H. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2(1), 71–106.
<https://doi.org/10.4155/bfs.10.81>
8. Lynam, J. G., Toufiq Reza, M., Yan, W., Vásquez, V. R., & Coronella, C. J. (2015). Hydrothermal carbonization of various lignocellulosic biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 5, 173–181. Retrieved from <http://moscow.sci-hub.tw/a83c578641a742172a48427e1d4cc73f2/10.1007%40s13399-014-0137-3.pdf>
9. McKendry, P. (2002a). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46.
[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
10. McKendry, P. (2002b). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47–54.
[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)
11. Reza, M. T., Yan, W., Uddin, M. H., Lynam, J. G., Hoekman, S. K., Coronella, C. J., & Vásquez, V. R. (2013). Reaction kinetics of hydrothermal carbonization of loblolly pine. *Bioresource Technology*, 139, 161–169.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.028>
12. Tekin, K., Karagöz, S., & Bektaş, S. (2014). A review of hydrothermal biomass processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 673–687.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.216>

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Proyecto BMBF-CONYCIT 001500267: “Premium wood pellets based on different lignocellulosic biomass by an innovative fuel design and HTC treatment – sustainable contribution to a clean heat supply in Chile and Germany.