

# **USO DE LA EXPLOSIÓN SÚBITA DE VAPOR COMO PRETRATAMIENTO PARA FRACCIONAR BIOMASA**

## *USE OF STEAM EXPLOSION AS PRE-TREATMENT TO FRACTION BIOMASS*

**Juan Quintanar Olguin**

C. E. San Martinito – CIRGOC - INIFAP  
*quintanar.juan@inifap.gob.mx*

**Edna Elena Suárez Patlán**

C. E. San Martinito – CIRGOC – INIFAP  
*suarez.edna@inifap.gob.mx*

**José Sandoval García**

Colegio de Postgraduados – Unidad COLPOS  
*sandoval\_gar@hotmail.com*

### **Resumen**

La finalidad del artículo es mostrar los conceptos básicos del tratamiento de explosión súbita de vapor o steam explosión, utilizado para fraccionar la estructura del material lignocelulósico mediante la acción hidrolítica del vapor a presión y altas temperaturas, con el fin de mejorar la digestibilidad enzimática de la celulosa. Los parámetros que afectan la efectividad del método de explosión súbita de vapor son: tamaño de las partículas, contenido de humedad, temperatura, presión, tiempo de procesamiento y el efecto combinado de la temperatura y el tiempo. Para lograr la comparación y optimización del proceso de explosión súbita de vapor se han desarrollado los índices de severidad ( $R_o$ ), severidad combinada (SC) y densidad de potencia de la explosión (DPE).

**Palabra(s) Clave:** Reactor, presión, alta temperatura, índice de severidad.

### **Abstract**

*The purpose of the article is to show the basic concepts of the steam explosion treatment, used to fractionate the structure of lignocellulosic material through the hydrolytic action of steam explosion under pressure and high temperatures, in order to improve the enzymatic digestibility of the cellulose. The parameters that affect*

*the effectiveness of the method of steam explosion are: particle size, moisture content, temperature, pressure, processing time and the combined effect of temperature and time. To achieve the comparison and optimization of the process of steam explosion have developed the indices of severity (Ro), combined severity (SC) and explosion power density (EPD).*

**Keywords:** *Reactor, pressure, high temperature, severity index.*

## **1. Introducción**

El proceso de explosión súbita de vapor (ESV) fue desarrollado y patentado por William H. Mason en 1926, partiendo del calentamiento de virutas de madera por medio de vapor a una cierta temperatura, presión y tiempo. Posteriormente, la presión se aumentó y las virutas se descargaron explotando a presión atmosférica. Este proceso fue utilizado para la producción de un tablero duro llamado Masonite [Stelte, 2014]. Posteriormente, en la década de 1950, el proceso de explosión súbita de vapor se utilizó a nivel comercial como medio para preparar la madera de desecho en la fabricación de tableros duros. Para las décadas de 1980 y 1990, se amplió el uso del proceso como medio de tratamiento previo de materiales lignocelulósicos para mejorar su digestibilidad como alimento para ganado o para producir azúcares a partir de madera mediante hidrólisis enzimática. En años recientes, se está investigando la viabilidad de la explosión súbita de vapor como un tratamiento previo para producir combustibles sólidos avanzados [Wolbers *et al*, 2018]. Actualmente, la explosión súbita de vapor o “steam explosión”, es considerado como uno de los métodos más exitosos para fraccionar la biomasa y mejorar la digestibilidad enzimática de la celulosa, por lo que es el método de tratamiento previo más comúnmente utilizado en las biorrefinerías comerciales [Lischeske *et al*, 2016; Russ *et al*, 2016; Pielhop *et al*, 2017]. Su alta eficiencia se debe a la destrucción termo-físico-química aplicada por el método [Capári *et al*, 2016]. La explosión súbita de vapor es un proceso termo-mecánico que consiste de tres pasos básicos [Jacquet *et al*, 2010; Muzamal, 2016; Wolbers *et al*, 2018]:

- Tratamiento de la biomasa con vapor a presión durante un período específico de tiempo.

- Liberación del vapor de manera súbita, causando rompimiento en la matriz celular de los materiales por la descompresión explosiva.
- Recuperación de las fracciones líquida y sólida del material en un tanque receptor, para su análisis posterior.

Este es un método de fraccionamiento de la estructura del material lignocelulósico mediante la acción hidrolítica del vapor a presión y altas temperaturas, que actúan a nivel de la pared celular, mediante la hidrólisis de los enlaces lignino-celulósicos, solubilizando la hemicelulosa y eliminando los grupos acetilo, con lo que se reduce el problema de la formación de inhibidores [Wang *et al*, 2015; Matsakas *et al*, 2018]. Sin embargo, puede generar degradación de las hemicelulosas que no es apropiada para algunos procesos posteriores [Lischeske *et al*, 2016].

La explosión súbita de vapor es una combinación de hidrólisis fisicoquímica, que implica modificaciones en las propiedades físicas y químicas de la biomasa, como la reactividad (relacionada con el área de superficie específica), la viscosidad o la cristalinidad entre otras [Sui y Chen, 2016].

A nivel físico se da la desagregación y ruptura de las fibras, causado por la evaporación del agua interna en las células, la cual causan cizalladuras que producen la separación de las fibras principalmente en las regiones amorfas de la celulosa.

A nivel químico se genera la despolimerización, rotura de enlaces y modificación del índice de cristalinidad de la celulosa, debido a la alta temperatura del proceso, lo que provoca la hidrolización de los grupos acetilos de las hemicelulosas para producir ácido acético y destruyendo parcialmente los enlaces lignina-carbohidrato [Jacquet *et al*, 2016; Medina *et al.*, 2016].

### **Parámetros clave del proceso**

Los principales parámetros que afectan la efectividad de la explosión súbita de vapor son el tamaño de las partículas, contenido de humedad, temperatura, presión, tiempo de procesamiento y el efecto combinado de la temperatura y el tiempo [Jacquet *et al*, 2010; Uzelac, 2014; Muzamal, 2016].

Para facilitar la comparación y optimización de los procesos de explosión súbita de vapor en biomasa, se ha generado un índice simple que define la severidad ( $R_0$ ) de la explosión en términos del efecto combinado de la temperatura y el tiempo de retención. Este modelo se basa en la hipótesis que la cinética del proceso es de primer orden y obedece a la ley de Arrhenius [Jacquet *et al*, 2010; Wang *et al*, 2015 Lischeske *et al*, 2016 y Muzamal, 2016] y puede describirse mediante ecuación 1.

$$R_0 = t \times e^{\left(\frac{T-100}{14.75}\right)} \quad (1)$$

Dónde:

- $R_0$  = Índice de severidad
- $t$  = tiempo de residencia (min)
- $T$  = Temperatura de reacción (°C)

Sin embargo, este modelo tiene limitantes al no considerar el contenido de humedad de la materia prima y el tamaño de las partículas que tienen una gran influencia en la cinética de los procesos de explosión de vapor sobre los cambios químicos y físicos de la biomasa. Además, la conductividad térmica del material biomasa varía según la especie y el tamaño de las partículas, que tienen un fuerte impacto en la calidad del producto de la biomasa fraccionada por vapor.

Por otro lado, para cuando se agrega algún producto químico como catalizador, se ha desarrollado un índice de severidad combinada (SC) mostrado en la ecuación 2 y que permite comparaciones de diferentes procesos catalizados por ácido, incorporando una función de acidez como tercer parámetro [Wang *et al*, 2015].

$$CS = \text{Log } R_0 - pH \quad (2)$$

Dónde:

- $CS$  = Índice de severidad combinada
- $pH$  = Potencial de hidrógeno

Recientemente, se ha introducido un nuevo parámetro en la evaluación del tratamiento de explosión súbita de vapor: densidad de potencia de la explosión (DPE), que refleja el efecto de la duración del proceso de explosión [Yu *et al*, 2012]. Como la explosión súbita de vapor se puede dividir en las fases de

ebullición del vapor (reacción termoquímica) y la fase de explosión (conversión de energía), la DPE teórica se basa en la hipótesis del proceso de expansión adiabática, como se muestra en la ecuación 3:

$$DPE = \frac{DH_v + DH_{al} + DH_m}{t \times V} \quad (3)$$

Dónde:

$DPE$  = Densidad de potencia de la explosión.

$DH_v$  = Caída de entalpía de vapor.

$DH_{al}$  = Caída de entalpía de agua líquida.

$DH_m$  = Caída de entalpía del material.

$t$  = Duración de la explosión.

$V$  = Volumen del reactor de explosión.

## 2. Método

Los componentes del equipo de explosión súbita de vapor son:

- Fuente de vapor, que consiste de un tanque fabricado bajo el diseño de caldera, con transmisión y liberación de presión y temperatura, operada automáticamente (figura 1). La fuente de calor se conforma por un quemador totalmente automático y una recámara de combustión con refractarios monolíticos, con salida de gases hacia la chimenea de condensación.

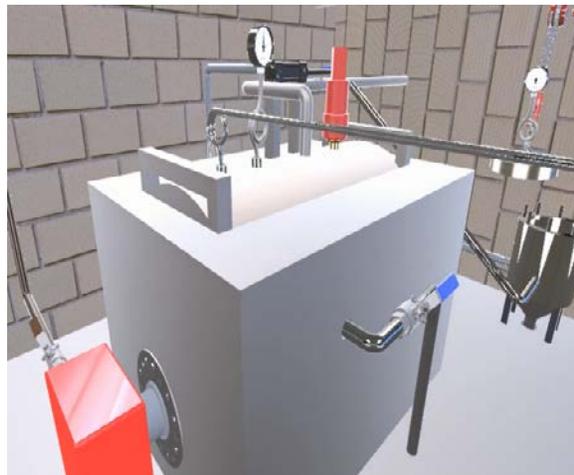


Figura 1 Fuente de vapor de explosión súbita de vapor.

- Reactor, es un tanque de acero inoxidable en forma de cono, donde el diámetro de entrada de vapor es menor al diámetro de salida del producto procesado (figura 2). Además, debe contar con una brida para presión y una válvula de liberación tipo esfera para de producto procesado.

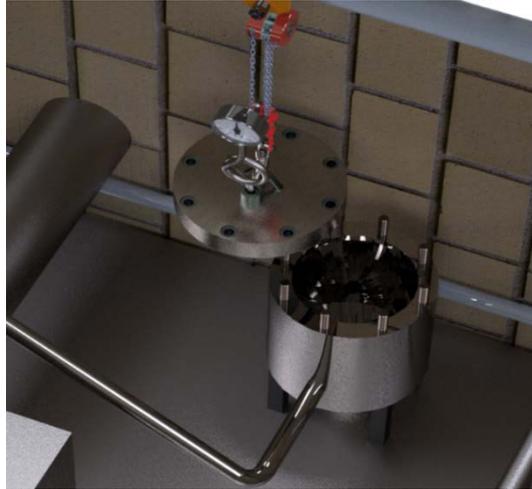


Figura 2 Reactor de explosión súbita de vapor.

- Tanque receptor, que sirve para el depósito del material procesado, cuenta con boquilla para entrada del producto, boquilla para incrustado de indicador y liberador de presión, brida para mantenimiento y limpieza, válvula de esfera para la salida del producto final (figura 3).

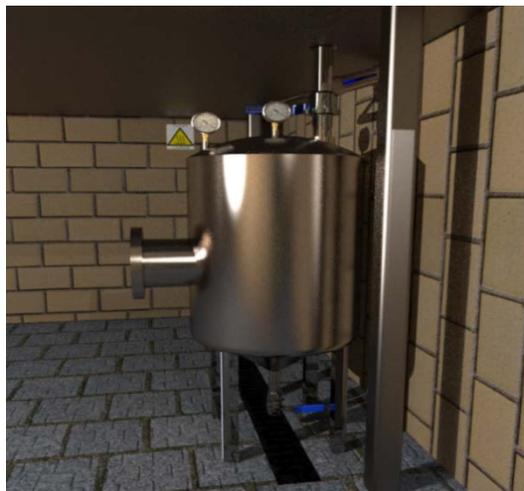


Figura 3 Tanque receptor.

### **3. Resultados y discusión**

La metodología de explosión súbita de vapor se muestra como una tecnología flexible que ha demostrado ser eficaz para una gran variedad de materias primas lignocelulósicas, incluidas las maderas duras, los pastos y los residuos agrícolas. Sin embargo, es poco efectivo para maderas blandas, que presentan alto contenido de lignina y recalcitración [Pielhop *et al.*, 2016]. Por otro lado, es una tecnología de bajo impacto ambiental [Montoya *et al.*, 2011], con ventajas sobre los métodos químicos como es su baja inversión de capital, su eficiencia energética y la posibilidad de tratar grandes cantidades de biomasa [Jacquet *et al.*, 2012].

Además, el tratamiento de la explosión súbita de vapor aplicado en astillas de madera mejorara la digestibilidad enzimática de la celulosa, pero debe llevarse a cabo con una severidad suficiente para suavizar la estructura de la lignocelulosa y una diferencia de presión suficiente para que la explosión pueda realizar su efecto al desfibrar la biomasa y disminuir su tamaño de partículas [Pielhop *et al.*, 2016].

Cuando la biomasa es sometida a explosión súbita de vapor muestra un cambio en sus características químicas, higroscopicidad, color, dureza, textura y conducta térmica. La hidrólisis incompleta de la celulosa es el resultado de la explosión de vapor con la inclusión de características volátiles, lignina y otros carbohidratos. Existe la posibilidad de que se descubran otros enlaces accesibles de enlaces glicosídicos, lignina  $\beta$ -éter y complejos de lignina-carbohidrato [Pourmakhdomi, 2014].

Como Wu *et al.* (1999) clasificaron el índice de severidad de acuerdo con la siguiente escala:  $R_0 = 3$  severidad baja,  $R_0 = 3.5$  severidad media y  $R_0 = 4.2$  como severidad alta. Esta debe ser elegida de acuerdo con el propósito del tratamiento posterior. Como la destrucción de la biomasa comienza aproximadamente con  $R_0 = 2$  y se tiene una severa destrucción cuando se tienen un  $R_0 > 4$ , ya que se produce deshidratación y se presentan reacciones de condensación, lo que genera degradación de los azúcares. Para la conversión bioquímica de la biomasa, se sugiere utilizar  $R_0$  con valores entre 2 y 4, mientras que puede ser  $R_0 > 4$  cuando el objetivo es aumentar el valor calorífico y la hidrofobicidad [Lam, 2011].

## **4. Conclusión**

El uso del pretratamiento de explosión súbita de vapor para el fraccionamiento de la estructura del material lignocelulósico, con el fin de mejorar la digestibilidad enzimática de la celulosa. Es una tecnología de bajo impacto ambiental, factible de usar para desarrollar procesos de obtención de biocombustibles menos contaminantes.

## **5. Revisores**

### **Revisor 1**

Nombre: Fabiola Eugenia Pedraza Bucio  
Institución: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo  
Cédula Profesional: 1981349  
Área de conocimiento: Química de productos forestales  
Correo electrónico: anilara\_9@hotmail.com

### **Revisor 2**

Nombre: Alina Luisa Ypushima Pinedo  
Institución: Universidad Nacional Intercultural de la Amazonia  
Cédula Profesional: 82254  
Área de conocimiento: Productos bióticos  
Correo electrónico: alinalu7@hotmail.com

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Capári D., G. Dörgó and A. Dallos. 2016. Comparison of the effects of thermal pretreatment, steam explosion and ultrasonic disintegration on digestibility of corn stover. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 4(2):107-126.
- [2] Jecquet N., G. Maniet, C. Vanderghem, F. Delvignet and F. Richel. 2016. Application of steam explosion as pretreatment on lignocellulosic material: a review. *Ind. Eng. XChem. Res.* 54(10):2593-2598.
- [3] Jacquet N., C. Vanderghem, C. Blecker and M. Paquot. 2010. La steam explosion: application en tant que prétraitement de la matière lignocellulosique. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 14(S2):561-566.

- [4] Jacquet, N., C. Vanderghem, S. Danthine, N. Quiévy, C. Blecker, J. Devaux & M. Paquot. 2012. Influence of steam explosion on physicochemical properties and hydrolysis rate of pure cellulose fibers. *Bioresource Technology* 121:221–227. DOI:10.1016/j.biortech.2012.06.073.
- [5] Lam, P. S. 2011. Steam explosion of biomass to produce durable pellets. PhD thesis. University of British Columbia, Vancouver, Canada. 166 p.
- [6] Lischeske J. J., N. C. Crawford, E. Kuhn, N. J. Nagle, D. J. Schell, M. P. Tucker, J. D. McMillan and E. J. Wolfrum. 2016. Assessing pretreatment reactor scaling through empirical analysis. *Biotechnol Biofuels* 9:213.
- [7] Matsakas L., C. Nitsos, V. Raghavendran, O. Yakimenko, G. Persson, E. Olsson, U. Rova, L. Olsson and P. Christakopoulos. 2018. A novel hybrid organosolv: steam explosion method for the efficient fractionation and pretreatment of birch biomass. *Biotechnol Biofuels* 11:160 <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1163-3>.
- [8] Medina, J. D. C., A. Woiciechowski, A. Z. Filho, P. S. Nigam, L. P. Ramos & C. R. Soccol. 2016. Steam explosion pretreatment of oil palm empty fruit bunches (EFB) using autocatalytic hydrolysis: A biorefinery approach. *Bioresource Technology* 199:173–180. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.08.126
- [9] Montoya M. I., J. A. Quintero, Ó. J. Sánchez T. y C. A. Cardona Á. 2011. Producción de etanol carburante: material lignocelulósico una nueva alternativa. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* :47–55.
- [10] Muzamal M. 2016. Structural modifications in spruce wood during steam explosion pretreatment: Experimental and numerical investigation. Thesis of Doctor of Philosophy. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. 62 p.
- [11] Pielhop T., J. Amgarten, M. H. Studer and P. R. von Rohr. 2017. Pilot-scale steam explosion pretreatment with 2-naphthol to overcome high softwood recalcitrance. *Biotechnol Biofuels* 10:130. DOI 10.1186/s13068-017-0816-y.
- [12] Pourmakhdomi, A. A. 2014. Comparison of energy balances of steam explosion and torrefaction technologies. Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology. Lappeenranta, Finlandia. 85 p.

- [13] Russ A., M. Fišerová, M. Letko and E. Opálená. 2016. Effect of steam explosion temperature on wheat straw enzymatic hydrolysis. *Wood research* 61(1):65-74.
- [14] Stelte, W. 2014. Steam explosion for biomass pre-treatment. Resultat Kontrakt (RK) Report. Centre for Renewable Energy and Transport. Taastrup, DK. 15 p.
- [15] Sui, W. & H. Chen. 2016. Effects of water states on steam explosion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 199:155–163. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.09.001.
- [16] Uzelac V. 2014. Comparative study of steam explosion pretreatment of birch and spruce. Master's thesis. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. 35 p.
- [17] Wang K., J. Chen, S. - N. Sun and R.- C. Sun. 2015. Steam Explosion, Chapter 6. Pretreatment of Biomass. DOI: 10.1016/B978-0-12-800080-9.00006-2.
- [18] Wolbers P., M. Cremers, T. Robinson, S. Madrali and G. Tourigny. 2018. Biomass pre-treatment for bioenergy. Case study 4: The steam explosion process technology. IEA Bioenergy. 16 p.
- [19] Wu M. M., K. Chang, D. J. Gregg, A. Boussaid, R. P. Beatson and J. N. Saddler. 1999. Optimization of steam explosion to enhance hemicellulose recovery and enzymatic hydrolysis of cellulose in softwoods. *Appl Biochem Biotechnol* 77-79:47-54.
- [20] Yu, Z., B. Zhang, F. Yu and A. Song. 2012. A real explosion: the requirement of steam explosion pretreatment. *Bioresource technology* 121:335-341.