

From waste to resource: recovery of a styrene-rich fraction from wind turbine blade pyrolysis oil

De residuo a recurso: recuperación de una fracción rica en estireno a partir del aceite de pirólisis de palas de aerogenerador

Fausto Viteri¹, María Soledad Callén¹, José Manuel López¹, Araceli Gálvez², Alberto Sánchez², Ramón Murillo¹, Tomás García¹

¹ Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC), Miguel Luesma Castán 4, 50018 Zaragoza, España.

² Acciona Construcción S.A., Valportillo Segunda 8, 28108, Madrid, España

fviteri@icb.csic.es

Resumen

Las palas de aerogenerador están constituidas por materiales compuestos en los que fibras de refuerzo, resinas termoestables y otros componentes permanecen íntimamente unidos. Esta estructura proporciona excelentes propiedades mecánicas durante su vida útil, pero dificulta considerablemente su reciclaje. La pirólisis constituye una alternativa para descomponer la matriz polimérica y recuperar diferentes productos sólidos, líquidos y gaseosos. Entre ellos, el aceite de pirólisis puede contener compuestos aromáticos de interés, como el estireno, cuya recuperación permitiría avanzar desde una valorización exclusivamente energética hacia una valorización química. En este trabajo se describe la destilación de un aceite procedente de la pirólisis de palas de aerogenerador, fraccionando el destilado en diferentes intervalos de recogida y evaluando distintas relaciones de reflujo para obtener una fracción enriquecida en estireno. En la condición más favorable, la concentración de estireno aumentó desde el 22,34 hasta el 75,85 % en peso. Sin embargo, la presencia de un 17,50 % de etilbenceno limitó la pureza final alcanzada. Los resultados muestran el potencial de la destilación como etapa inicial de concentración y ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar estrategias complementarias para separar compuestos de volatilidad similar.

1. Introducción

1.1. El final de vida de las palas eólicas

La transición hacia un modelo energético con menores emisiones de carbono ha impulsado notablemente la instalación de fuentes de energía renovable en las últimas décadas. Sin embargo, su desarrollo también debe considerar la gestión de los materiales empleados en sus infraestructuras cuando alcanzan el final de su vida útil. Desde la perspectiva de la economía circular, no basta con producir energía renovable, sino que resulta necesario mantener durante el mayor tiempo posible el valor de los productos, materiales y recursos, reduciendo tanto la generación de residuos como la dependencia de materias primas vírgenes [1].

En el ámbito de la energía eólica, las palas constituyen uno de los componentes más difíciles de gestionar al final de su vida útil. Un estudio ampliamente citado estimó que los residuos acumulados de palas podrían alcanzar alrededor de 43 millones de toneladas a escala mundial en 2050 [2]. Aunque esta previsión depende de la evolución de la potencia instalada, la vida útil de los aerogeneradores y las estrategias de repotenciación, pone de manifiesto la necesidad de desarrollar alternativas de tratamiento técnica y económicamente viables. A diferencia de otros

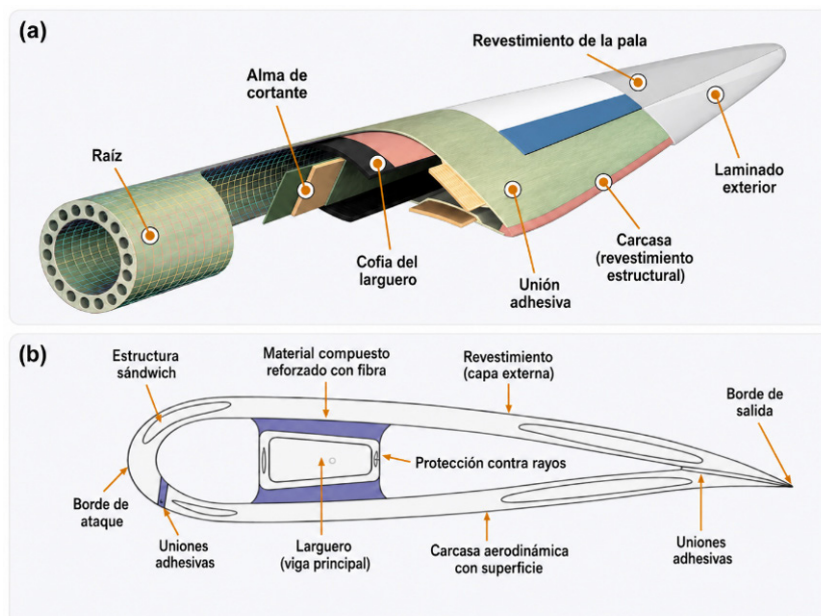


Figura 1. a) Estructura interna de una pala de aerogenerador. b) Corte transversal de los elementos internos de una pala de aerogenerador. Adaptado de Riley et al. [4].

Figure 1. a) Internal structure of a wind turbine blade. b) Cross-section of its main structural elements. Adapted from Riley et al. [4].

componentes de los aerogeneradores, fabricados principalmente con metales, las palas presentan una composición heterogénea (Figura 1) y una estructura diseñada para soportar durante años elevadas cargas mecánicas y condiciones ambientales exigentes [2,3].

En este contexto, las palas se fabrican mayoritariamente con materiales compuestos constituidos por fibras de vidrio o de carbono embebidas en matrices poliméricas termoestables, principalmente resinas epoxi, de poliéster insaturado o de viniléster. Además, pueden incorporar adhesivos estructurales, revestimientos que protegen frente a la radiación UV y la humedad, cargas minerales y materiales de núcleo, como madera de balsa o espumas poliméricas de PET o PVC. Esta combinación proporciona una elevada resistencia específica, rigidez y durabilidad, pero dificulta considerablemente su separación y reciclaje. En particular, las resinas termoestables forman durante el curado una red tridimensional altamente reticulada que, a diferencia de los materiales termoplásticos, no puede fundirse y remodelarse mediante calentamiento [3, 5, 6].

Entre las alternativas estudiadas se encuentran la reutilización de segmentos de pala, el reciclaje mecánico, el coprocesamiento en cementeras, la solvolisis y los tratamientos termoquímicos [3,5,6]. El reciclaje mecánico permite aprovechar

el material triturado como carga en nuevos productos, aunque generalmente reduce su valor. Los tratamientos químicos pueden recuperar fibras y compuestos derivados de la resina, pero suelen requerir disolventes específicos y condiciones de operación exigentes, además de etapas posteriores para recuperar y reutilizar esos disolventes, lo que puede dificultar su escalado industrial. La pirólisis, por su parte, descompone térmicamente la matriz polimérica en ausencia de oxígeno y genera tres corrientes principales: una fracción sólida, un líquido condensable y gases no condensables (Figura 2) [5-7].

La fracción sólida obtenida durante la pirólisis contiene principalmente las fibras de refuerzo, cargas minerales y una cantidad variable de residuo carbonoso. El gas está constituido por diferentes compuestos ligeros y puede contribuir parcialmente al suministro energético del propio proceso. La fracción líquida, comúnmente denominada aceite de pirólisis, constituye una mezcla compleja de hidrocarburos aromáticos, compuestos oxigenados y productos derivados de la degradación de la matriz polimérica. La composición y los rendimientos de estas corrientes dependen del tipo de resina y de fibra, de la temperatura, del tiempo de residencia, de la velocidad de calentamiento y de la configuración del reactor [7-9].



Figura 2. Productos obtenidos en la pirólisis de residuos de palas de aerogenerador y sus posibles rutas de valorización.

Figure 2. Products obtained from the pyrolysis of wind turbine blade waste and their potential recovery pathways.

En estudios de materiales compuestos basados en resinas de poliéster insaturado se ha observado que el aceite puede presentar un elevado contenido de compuestos aromáticos, entre los que se encuentran estireno, etilbenceno, tolueno, α -metilestireno y otros derivados del benceno. Así, López et al. [7] obtuvieron, mediante la termólisis de un composite de fibra de vidrio y poliéster, un aceite formado mayoritariamente por compuestos aromáticos, identificando el estireno entre sus principales productos. Más recientemente, Yousef et al. [8] estudiaron directamente la pirólisis de palas de aerogenerador fabricadas con fibra de vidrio y resina de poliéster insaturado, demostrando la posibilidad de recuperar simultáneamente

fibras de vidrio y un aceite rico en estireno. Otros estudios han confirmado que las condiciones de pirólisis y la atmósfera de operación afectan tanto a la distribución de los productos como a las características de las fibras recuperadas [9].

La presencia de estireno en el aceite abre la posibilidad de avanzar desde una valorización exclusivamente energética hacia la recuperación de productos químicos de mayor valor añadido. Sin embargo, el aceite de pirólisis es una mezcla compleja y no puede emplearse directamente como fuente de estireno, por lo que requiere operaciones posteriores de separación y acondicionamiento [8,10].

En estudios de materiales compuestos basados en resinas de poliéster insaturado se ha observado que el aceite puede presentar un elevado contenido de compuestos aromáticos, entre los que se encuentran estireno, etilbenceno, tolueno, α -metilestireno y otros derivados del benceno. Así, López et al. [7] obtuvieron, mediante la termólisis de un composite de fibra de vidrio y poliéster, un aceite formado mayoritariamente por compuestos aromáticos, identificando el estireno entre sus principales productos. Más recientemente, Yousef et al. [8] estudiaron directamente la pirólisis de palas de aerogenerador fabricadas con fibra de vidrio y resina de poliéster insaturado, demostrando la posibilidad de recuperar simultáneamente fibras de vidrio y un aceite rico en estireno. Otros estudios han confirmado que las condiciones de pirólisis y la atmósfera de operación afectan tanto a la distribución de los productos como a las características de las fibras recuperadas [9].

La presencia de estireno en el aceite abre la posibilidad de avanzar desde una valorización exclusivamente energética hacia la recuperación de productos químicos de mayor valor añadido. Sin embargo, el aceite de pirólisis es una mezcla compleja y no puede emplearse directamente como fuente de estireno, por lo que requiere operaciones posteriores de separación y acondicionamiento [8,10].

1.2. ¿Por qué interesa recuperar el estireno?

El interés por recuperar el estireno no se debe únicamente a su elevada presencia en el aceite de pirólisis. Se trata de una materia prima ampliamente empleada para fabricar poliestireno y poliestireno expandido (EPS), copolímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) y estireno-acrilonitrilo (SAN), caucho estireno-butadieno y resinas de poliéster insaturado. Estos materiales están presentes en envases, aislamientos térmicos, componentes de automoción, electrodomésticos, equipos electrónicos, recubrimientos y productos de caucho (Figura 3) [11].

En el caso de las resinas de poliéster insaturado, el estireno cumple una doble función: reduce la viscosidad de la formulación y participa en la reacción de reticulación que transforma la resina líquida en un material sólido y resistente [12]. Por ello, la recuperación de una corriente rica en este compuesto resulta especialmente interesante dentro de una estrategia de valorización química. No obstante, antes de considerar su reutilización sería necesario aumentar su pureza, comprobar su estabilidad y evaluar su comportamiento en la aplicación de destino.

Para aprovechar este potencial, el aceite debe transformarse primero en una corriente de composición más sencilla y con una mayor concentración de estireno. La destilación fraccionada constituye una de las primeras operaciones que pueden emplearse con este objetivo.

1.3. La destilación: una herramienta para concentrar el estireno

La destilación constituye una de las principales opciones para fraccionar estos aceites, ya que permite separar parcialmente sus componentes de acuerdo con sus diferencias de volatilidad. Este proceso ha sido estudiado en aceites de pirólisis de poliestireno, cuya composición presenta determinadas similitudes con los aceites ricos en estireno procedentes de resinas de poliéster. Dahal et al. [10] combinaron experimentos y simulaciones para diseñar un proceso de destilación orientado a la recuperación de estireno a partir de aceite de pirólisis de poliestireno, mostrando que es posible retirar compuestos ligeros y concentrar el monómero en fracciones específicas. Sin embargo, la composición más heterogénea de los aceites procedentes de palas reales puede introducir dificultades adicionales relacionadas con la presencia de compuestos oxigenados, oligómeros, partículas y sustancias de elevado punto de ebullición.



Figura 3. Relación entre el etilbenceno, el estireno y algunas de sus principales aplicaciones industriales.

Figure 3. Relationship between ethylbenzene, styrene and some of their main industrial applications.

En comparación con los numerosos trabajos dedicados a la pirólisis y a la caracterización de los productos obtenidos, la literatura relacionada con el fraccionamiento posterior de aceites reales de palas de aerogenerador continúa siendo limitada. En particular, resulta necesario determinar en qué medida las condiciones de operación de la destilación, como la presión, el intervalo de recogida y la relación de reflujo, permiten aumentar la concentración de estireno y cómo afectan simultáneamente a su recuperación. Los antecedentes disponibles sugieren que la destilación puede actuar como una etapa inicial de preconcentración, aunque probablemente deba combinarse con otras operaciones para alcanzar una pureza elevada [8,10,13].

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo fue evaluar la destilación fraccionada como primera etapa para recuperar una corriente rica en estireno a partir del aceite de pirólisis de palas de aerogenerador. Para ello, el destilado se dividió en diferentes intervalos de recogida y se evaluaron distintas relaciones de reflujo, analizando tanto el enriquecimiento alcanzado como la cantidad de estireno recuperada. También se identificaron las principales limitaciones del proceso, especialmente las asociadas a la presencia de etilbenceno.

3. Actividades realizadas

3.1. De la pala al aceite de pirólisis

Se utilizó un aceite obtenido mediante la pirólisis de una placa previamente segregada de material compuesto procedente de una pala de aerogenerador, constituida principalmente por fibra de vidrio y una matriz de resina de poliéster. El tratamiento se realizó a 550 °C en un reactor de lecho fijo, en condiciones de ausencia de oxígeno. Los vapores generados durante la descomposición térmica de la matriz polimérica se enfriaron para recuperar la fracción líquida condensable, denominada aceite de pirólisis.

El aceite fue caracterizado mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID), utilizando calibración específica para una selección de compuestos aromáticos y oxigenados de interés. Se realizaron dos repeticiones, y la dispersión entre las dos inyecciones se representó mediante la desviación estándar. Como se muestra en la Figura 4, el estireno fue el compuesto mayoritario entre las especies cuantificadas, con una concentración del $22,34 \pm 0,58$ % en peso. También se detectaron cantidades relevantes de etilbenceno, tolueno y α -metilestireno, con concentraciones de $8,55 \pm 0,24$ %, $5,75 \pm 0,18$ % y $4,50 \pm 0,11$ % en peso, respectivamente. La elevada presencia de estireno motivó el estudio posterior de la destilación como una primera etapa para su concentración y recuperación.

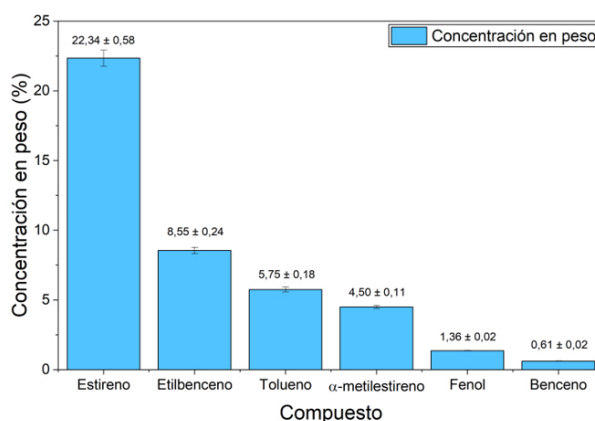


Figura 4. Concentración de los principales compuestos de interés cuantificados en el aceite de pirólisis. Las barras de error representan la desviación estándar (n=2).

Figure 4. Concentrations of the main compounds of interest quantified in the pyrolysis oil. The error bars represent the standard deviation (n=2)

3.2. ¿Cómo se concentró el estireno?

Una vez conocida la composición del aceite, el siguiente paso consistió en estudiar si era posible concentrar el estireno mediante destilación fraccionada. Para ello se utilizó un equipo automatizado Pilodist 104, provisto de una columna equivalente a 40 platos teóricos y operado a una presión de 133 mbar bajo atmósfera de nitrógeno (Figura 5).

El aceite de pirólisis se introduce en un calderín, donde se calienta para generar vapores que ascienden por la columna de destilación. A lo largo de la columna se producen sucesivos contactos entre el vapor ascendente y el líquido que desciende, favoreciendo la separación de los componentes según sus diferencias de volatilidad. Los compuestos más volátiles tienden a alcanzar antes la parte superior de la columna, mientras que los menos volátiles permanecen durante más tiempo en las zonas inferiores.

La capacidad de separación de la columna se expresa mediante el número de platos teóricos. Estos no corresponden necesariamente a platos físicos, sino que representan etapas ideales sucesivas de contacto entre las fases líquida y vapor. En este caso, la columna utilizada equivale a 40 platos teóricos, lo que permite realizar una separación más eficaz que una destilación simple.

Trabajar a vacío permite disminuir la temperatura necesaria para vaporizar los componentes del aceite. Además, la presión de operación influye en el equilibrio líquido-vapor y, por tanto, en el comportamiento de los diferentes compuestos durante la destilación. Por su parte, el uso de nitrógeno permite mantener una atmósfera inerte durante el proceso.

En la parte superior de la columna, los vapores se condensan. Una parte del líquido condensado se recoge como destilado, mientras que otra se devuelve a la columna como reflujo.

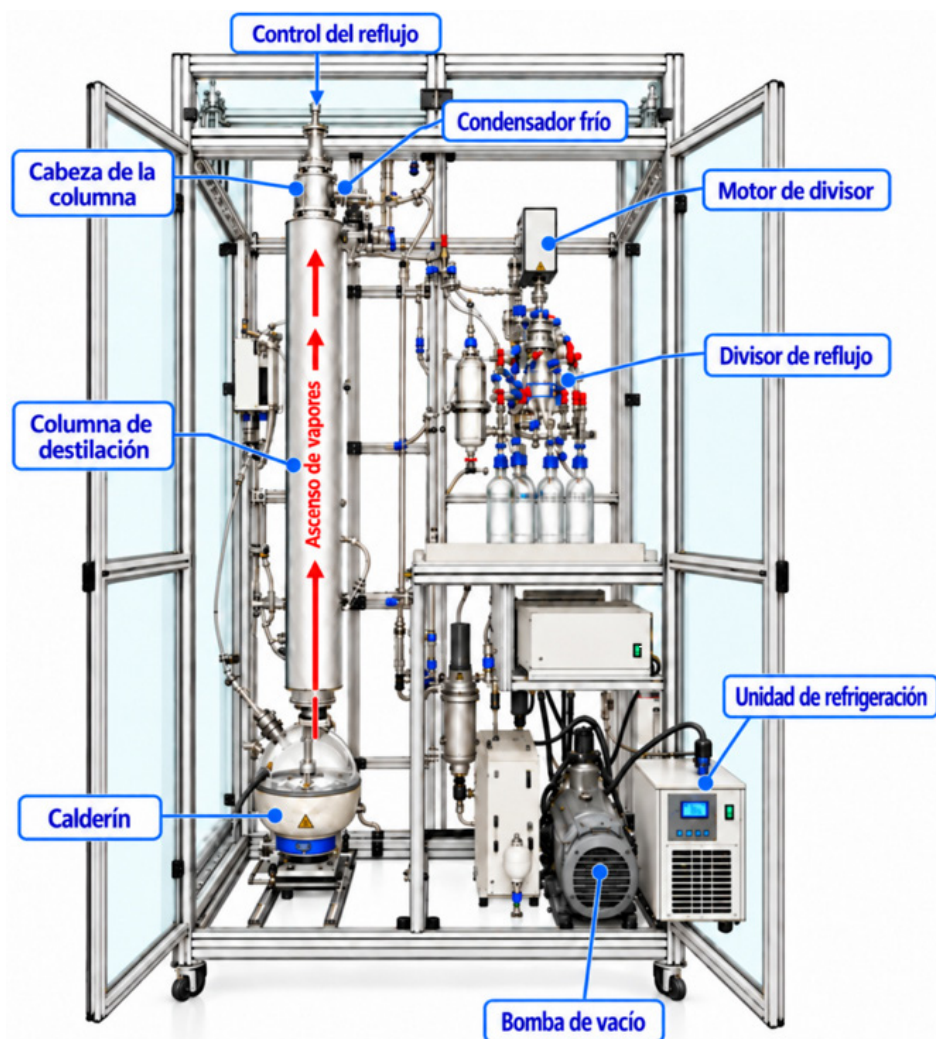


Figura 5. Representación del equipo de destilación Pilodist 104.

Figure 5. Diagram of the Pilodist 104 distillation unit.

Este retorno aumenta el contacto entre las fases líquida y vapor y favorece la separación de compuestos con volatilidades diferentes. La relación de reflujo indica la proporción de líquido condensado que retorna a la columna respecto a la que se retira como destilado. Así, una relación 6:1 implica que, por cada parte recogida como producto, aproximadamente seis partes retornan a la columna para continuar participando en el proceso de separación.

Se estudiaron varias condiciones de reflujo y se recogieron diferentes fracciones, que posteriormente fueron analizadas mediante cromatografía de gases. Se evaluaron relaciones de reflujo de 2:1, 4:1, 6:1, 8:1 y 10:1. En cada ensayo se registraron las temperaturas del calderín y de la cabeza de la columna, así como la masa recuperada en cada fracción y la masa del residuo final.

Con el fin de separar progresivamente los compuestos de acuerdo con su volatilidad, el destilado se dividió en diferentes intervalos de recogida. Se obtuvo una primera fracción correspondiente a los compuestos más volátiles, seguida de un corte intermedio orientado a la concentración del estireno y una tercera fracción que agrupó compuestos de menor volatilidad,

como el α -metilestireno y el fenol. Además, se recogieron separadamente los líquidos retenidos en el precondensador y el residuo remanente en el calderín al finalizar la operación.

Como la destilación se realizó a vacío, las temperaturas registradas durante el proceso son inferiores a las que corresponderían a la misma mezcla a presión atmosférica. Para facilitar la interpretación de los resultados y su comparación con los puntos de ebullición habituales de los compuestos, los límites de las fracciones se expresaron mediante temperaturas de ebullición equivalentes a presión atmosférica. Esta temperatura equivalente permite representar, a una presión de referencia de 1 atm, el comportamiento de ebullición observado durante la destilación a vacío.

En el ensayo de referencia, con una relación de reflujo 2:1, se establecieron tres cortes definidos mediante temperaturas de ebullición equivalentes a presión atmosférica: hasta 132 °C, entre 132 y 160 °C y entre 160 y 190 °C. Cada fracción fue pesada y analizada mediante GC-FID para determinar su concentración de benceno, tolueno, etilbenceno, estireno, fenol y α -metilestireno. Para el resto de relaciones de reflujo se mantuvieron los mismos intervalos de recogida.

4. Resultados obtenidos

Los resultados de la destilación permiten responder a tres preguntas fundamentales: ¿en qué fracción se concentró el estireno?, ¿qué efecto tuvo la relación de reflujo? y ¿por qué no fue posible obtener estireno de elevada pureza? Las respuestas muestran tanto el potencial de esta operación como las limitaciones que todavía deben superarse.

4.1. ¿Dónde se concentró el estireno?

La destilación permitió repartir los componentes del aceite de pirólisis en fracciones con composiciones claramente diferenciadas. Los compuestos más volátiles, principalmente el benceno y el tolueno, se concentraron en el primer corte. El estireno se acumuló preferentemente en la fracción intermedia, recogida entre 132 y 160 °C, mientras que compuestos de menor volatilidad, como el fenol y el α -metilestireno, aparecieron principalmente en el corte de mayor temperatura.

Esta distribución confirmó que la destilación podía simplificar una mezcla inicialmente compleja y dirigir buena parte del estireno hacia una sola corriente. En el ensayo realizado con una relación de reflujo de 6:1 se alimentaron 1000,35 g de aceite de pirólisis y se recuperaron 978,02 g entre las diferentes fracciones y el residuo final. Esto representa un cierre global de masa del 97,77 %, indicando que la mayor parte del material introducido en el equipo pudo ser contabilizada.

La fracción recogida entre 132 y 160 °C representó el 24,94 % de la masa inicial y alcanzó una concentración de estireno del 75,85 % en peso, frente al 22,34 % presente en el aceite original. En otras palabras, la destilación multiplicó por aproximadamente 3,4 la concentración de estireno.

Además del enriquecimiento, resulta importante considerar cuánto estireno fue realmente recuperado. Esta fracción intermedia reunió aproximadamente el 84,7 % del estireno inicialmente contenido en el aceite. Por tanto, no solo fue la corriente con mayor concentración, sino también la que capturó la mayor parte del compuesto disponible.

Este resultado muestra que una única operación de destilación fraccionada puede transformar el aceite de pirólisis en una corriente mucho más sencilla y rica en estireno. Sin embargo, aumentar la concentración de un compuesto no significa necesariamente obtenerlo con elevada pureza, como se analiza en los apartados siguientes.

4.2. ¿Más reflujo significa siempre una mejor separación?

En principio, aumentar la relación de reflujo puede favorecer la separación al incrementar el contacto entre las fases líquida y vapor. No obstante, devolver una mayor cantidad de líquido también prolonga la operación y puede aumentar el consumo energético, ya que una mayor proporción

del condensado retorna a la columna y debe volver a participar en los ciclos de vaporización y condensación. Además, puede modificar la distribución de los compuestos entre las diferentes fracciones.

La Figura 6 compara las concentraciones de estireno y etilbenceno obtenidas en la fracción de 132-160 °C para las relaciones de reflujo de 2:1, 4:1, 6:1, 8:1 y 10:1.

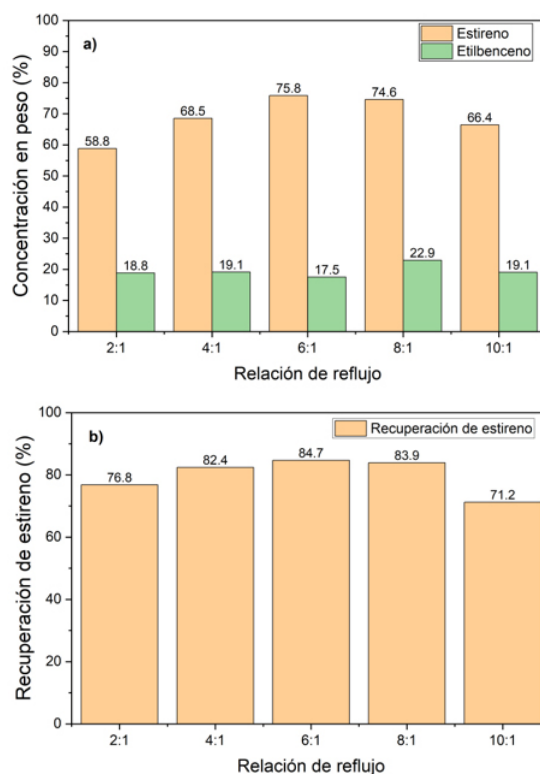


Figura 6. Efecto de la relación de reflujo sobre la concentración y recuperación de estireno: a) concentración de estireno y etilbenceno en la fracción enriquecida; b) recuperación de estireno en la fracción enriquecida.

Figure 6. Effect of reflux ratio on styrene concentration and recovery: a) styrene and ethylbenzene concentrations in the enriched fraction; b) styrene recovery in the enriched fraction.

Al aumentar la relación de reflujo desde 2:1 hasta 6:1, la concentración de estireno aumentó progresivamente desde el 58,8 hasta el 75,8 % en peso. La condición 6:1 proporcionó, por tanto, el mayor enriquecimiento entre los ensayos realizados.

Sin embargo, la tendencia no continuó al seguir aumentando el reflujo. Con una relación de 8:1, la concentración de estireno descendió ligeramente hasta el 74,6 %, mientras que con 10:1 disminuyó de forma más acusada hasta el 66,4 %.

Además de la concentración alcanzada, resulta importante considerar la recuperación de estireno, es decir, qué proporción del estireno inicialmente presente en el aceite termina en la fracción de 132-160 °C. Ambos parámetros son complementarios: una fracción puede presentar una elevada concentración de estireno, pero resultar menos interesante si solo recupera una pequeña parte del compuesto inicialmente disponible. La recuperación siguió una tendencia similar a la observada para la concentración de estireno: aumentó desde el

la concentración de estireno: aumentó desde el 76,8 % para una relación de reflujo de 2:1 hasta un máximo del 84,7 % para 6:1, se mantuvo próxima a este valor con 8:1 (83,9 %) y descendió hasta el 71,2 % con 10:1.

Estos resultados muestran que aumentar la relación de reflujo no implica necesariamente una mejor separación. Dentro de las condiciones estudiadas, la relación 6:1 proporcionó simultáneamente la mayor concentración de estireno y la mayor recuperación en la fracción enriquecida. El resultado final también puede depender del tiempo de operación, de la cantidad de material que retorna a la columna y de cómo se distribuyen los distintos compuestos entre las fracciones.

4.3. El etilbenceno: un compañero difícil de separar

Aunque la fracción obtenida con una relación de reflujo de 6:1 contenía principalmente estireno, todavía incluía una proporción importante de etilbenceno. Su composición fue del 75,8 % de estireno, 17,5 % de etilbenceno y 6,6 % de otros compuestos, calculados por diferencia hasta completar el 100 % (Figura 7).



Figura 7. Principales componentes de la fracción obtenida en la destilación en reflujo 6:1.

Figure 7. Main components of the fraction obtained from the 6:1 reflux distillation.

Por tanto, el producto obtenido no puede considerarse estireno purificado. El término más adecuado es fracción enriquecida en estireno, ya que la destilación aumentó notablemente su concentración, pero no consiguió separarlo completamente del resto de los componentes.

La principal dificultad se encuentra en la similitud de las propiedades físicas del estireno y el etilbenceno. A presión atmosférica, el etilbenceno hierve aproximadamente a 136 °C y el estireno alrededor de 145 °C [14]. Aunque el trabajo a vacío reduce las temperaturas necesarias para vaporizarlos, no elimina la similitud entre sus volatilidades. Como resultado, ambos compuestos

presentan comportamientos de destilación próximos, de modo que una parte importante del etilbenceno acompaña al estireno en el mismo corte.

La elevada eficacia de la columna y el empleo de reflujo mejoraron la separación, pero no fueron suficientes para aislar ambos compuestos mediante una única operación. Esto explica por qué el etilbenceno continuó representando el segundo componente mayoritario de la fracción enriquecida.

No obstante, el etilbenceno no debe considerarse únicamente una impureza sin valor. Industrialmente se utiliza como materia prima para la producción de estireno [13]. Por ello, una separación posterior más selectiva podría generar dos corrientes potencialmente aprovechables: una rica en estireno y otra enriquecida en etilbenceno. Antes de plantear su reutilización sería necesario comprobar su pureza, estabilidad y comportamiento en la aplicación de destino.

En conjunto, los resultados muestran que la destilación constituye una etapa eficaz de preconcentración. Permite recuperar en una sola fracción la mayor parte del estireno contenido en el aceite, pero debe combinarse con otra operación de separación cuando se requiera una corriente de mayor pureza.

5. Retos y perspectivas

El siguiente paso será evaluar operaciones complementarias que permitan aumentar la pureza de la fracción obtenida. Una de las alternativas es la destilación extractiva con sulfolano u otros disolventes selectivos, capaces de modificar el equilibrio vapor-líquido y favorecer la separación entre el estireno y el etilbenceno [13].

La elección de la estrategia más adecuada deberá considerar no solo la pureza final, sino también la recuperación de estireno, el consumo energético, la estabilidad del monómero y la posibilidad de aprovechar otras corrientes del proceso. Estas alternativas podrían convertir la fracción enriquecida obtenida mediante la destilación inicial en una alimentación más adecuada para posteriores etapas de purificación y valorización química.

6. Conclusiones

Las palas de aerogenerador constituyen un residuo especialmente complejo debido a la combinación de fibras, resinas termoestables y otros materiales difícilmente separables. Sin embargo, mediante procesos como la pirólisis, parte de esta complejidad puede transformarse en corrientes con potencial de aprovechamiento. Entre ellas, el aceite de pirólisis no debe considerarse únicamente como un posible combustible, ya que también contiene compuestos aromáticos de interés que pueden recuperarse mediante operaciones posteriores de separación.

En este trabajo, la destilación fraccionada permitió

aumentar la concentración de estireno desde el 22,3 % presente en el aceite inicial hasta un máximo del 75,8 % en peso. Además, una única fracción concentró cerca del 85 % del estireno inicialmente disponible, lo que demuestra que la destilación puede actuar como una etapa eficaz de preconcentración.

No obstante, la presencia de una cantidad relevante de etilbenceno pone de manifiesto que obtener estireno de elevada pureza continúa siendo un reto. Será necesario combinar la destilación con otras estrategias de separación y evaluar posteriormente la calidad y las posibles aplicaciones de la corriente obtenida. Estos avances representan un paso hacia una valorización de mayor valor añadido de las palas al final de su vida útil y contribuyen al desarrollo de soluciones más circulares para el sector eólico.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto CICLO, Cooperación e Investigación para la Circularidad en la Industria Eólica (PLEC2024-011215), financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y la Agencia Estatal de Investigación (MICIU/AEI/10.13039/501100011033) y por FEDER, UE. Los autores agradecen la colaboración del consorcio formado por empresas y organismos de investigación.

Bibliografía

- [1] J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert, Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, *Resources, Conservation and Recycling*. 127 (2017) 221-232.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- [2] P. Liu, C.Y. Barlow, Wind turbine blade waste in 2050, *Waste Management*. 62 (2017) 229-240.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007>
- [3] J.P. Jensen, K. Skelton, Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 97 (2018) 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041>
- [4] D.-K. Riley, Y. Chen, C. Lu, I. Mohagheghian, H. Hassanin, P. Sareh, Morphing structural materials used in wind turbine blades, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 216 (2025) 115618.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115618>
- [5] G. Oliveux, L.O. Dandy, G.A. Leeke, Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties, *Progress in Materials Science*. 72 (2015) 61-99.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>
- [6] S.J. Pickering, Recycling technologies for thermoset composite materials-current status, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 37 (2006) 1206-1215.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.030>
- [7] F.A. López, M.I. Martín, F.J. Alguacil, J.M. Rincón, T.A. Centeno, M. Romero, Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass-ceramic material, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 93 (2012) 104-112.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.10.003>
- [8] S. Yousef, J. Eimontas, K. Zakarauskas, N. Striugas, Recovery of styrene-rich oil and glass fibres from fibres-reinforced unsaturated polyester resin end-of-life wind turbine blades using pyrolysis technology, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 173 (2023) 106100.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106100>
- [9] M. Xu, H. Ji, Y. Wu, J. Di, X. Meng, H. Jiang, Q. Lu, The pyrolysis of end-of-life wind turbine blades under different atmospheres and their effects on the recovered glass fibers, *Composites Part B: Engineering*. 251 (2023) 110493.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110493>
- [10] R. Dahal, P. Uusi-Kyyny, J.-P. Pokki, T. Ohra-aho, V. Alopaeus, Conceptual design of a distillation process for the separation of styrene monomer from polystyrene pyrolysis oil: Experiment and simulation, *Chemical Engineering Research and Design*. 195 (2023) 65-75.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.05.039>
- [11] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Styrene, Styrene-7,8-oxide, and Quinoline, *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. 121 (2019), International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
- [12] E.M.S. Sanchez, C.A.C. Zavaglia, M.I. Felisberti, Unsaturated polyester resins: Influence of the styrene concentration on the miscibility and mechanical properties, *Polymer*. 41 (2000) 765-769.
[https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00184-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00184-6)
- [13] M.T.G. Jongmans, E. Hermens, M. Raijmakers, J.I.W. Maassen, B. Schuur, A.B. de Haan, Conceptual process design of extractive distillation processes for ethylbenzene/styrene separation, *Chemical Engineering Research and Design*. 90 (2012) 2086-2100.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.05.019>
- [14] National Institute of Standards and Technology, NIST Chemistry WebBook, SRD 69: Ethylbenzene (CAS 100-41-4) and Styrene (CAS 100-42-5), thermochemical data, <https://webbook.nist.gov/chemistry/> (consultado el 31 de julio de 2026).