

Trabajo Fin de Grado

Estudio del aprovechamiento termoquímico de
residuos textiles

Study of the thermochemical use of textile waste

Autor/es

Sara Sancho Munárriz

Director/es

Jesús Arauzo Pérez

Grado en Ingeniería Química

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Curso 2021/2022

Resumen

La industria textil es uno de los sectores industriales más extensos e importantes del mundo. La moda rápida y el incremento de consumo de la sociedad ha supuesto un desarrollo más rápido de esta industria, lo que ha llevado a una producción masiva de textiles. Esto implica un gran problema, no solo por su producción, que muchas veces es poco sostenible sino también por los residuos que se generan.

La solución más acertada ante este gran problema se basa en la economía circular: reducir, reutilizar y reciclar. Actualmente, podemos encontrar diferentes métodos de reciclaje de residuos textiles, pero no todos son útiles cuando estos residuos corresponden a diferentes mezclas de materiales.

Este Trabajo de Fin de Grado se ha enfocado en el estudio de la posible aplicación de los procesos termoquímicos como solución a mezclas complejas de residuos textiles. De esta forma, se convierten estos residuos en un producto de valor añadido o combustibles.

Los procesos termoquímicos que se han analizado son: la pirólisis, la torrefacción, la gasificación y la carbonización. Además, no solo se ha centrado en mezcla de textiles, sino que también se ha estudiado en fibras específicas: algodón, poliéster, viscosa y lana, ya que la mayor parte de las mezclas residuales están compuestas por diferentes porcentajes de estos materiales. Inicialmente, se ha realizado un estudio bibliográfico para conocer con detalle el estado del arte en el aprovechamiento termoquímico de estos residuos, presentándose unas tablas a modo de resumen con la información más destacada encontrada, y posteriormente se han analizado sus desarrollos, sus características y los productos generados.

Finalmente, se ha centrado el trabajo en la gasificación de estos materiales, elaborándose una aplicación en EES que incorpora un modelo de gasificación, realizándose la simulación del procesado de diferentes fibras textiles y mezclas, y analizándose los resultados, y productos generados.

Índice general

Índice

1	Introducción	9
1.1	Antecedentes	9
1.1.1	La producción de los textiles y su importancia en la economía.....	9
1.1.2	Materiales textiles.....	10
1.1.3	Los grandes problemas de su producción y los residuos generados	11
1.1.4	Objetivos que presentan en la actualidad la industria textil	12
1.1.5	La solución más sostenible: Economía circular	13
1.1.6	Una alternativa al reciclaje tradicional.....	14
1.2	Objetivos del trabajo.....	15
2	Estudios de los procesos termoquímicos en las diferentes fibras	16
2.1	Fibra de algodón.....	19
2.1.1	Pirólisis de la fibra de algodón	19
2.1.2	Gasificación de la fibra de algodón	20
2.1.3	Torrefacción de la fibra de algodón	22
2.1.4	Carbonización hidrotermal de la fibra de algodón.....	23
2.2	Fibra de poliéster	24
2.2.1	Pirólisis de la fibra de poliéster	24
2.2.2	Gasificación de la fibra de poliéster	25
2.2.3	Torrefacción de la fibra de poliéster	27
2.3	Fibra de viscosa	28
2.3.1	Pirólisis de la fibra de viscosa	28
2.3.2	Torrefacción de la fibra de viscosa.....	28
2.3.3	Carbonización hidrotermal de la fibra de viscosa	29
2	Fibra de lana.....	29
2.4.1	Pirólisis de la fibra de lana.....	29
2.4.2	Gasificación de la fibra de lana.....	29
2.4.3	Torrefacción de la fibra de lana.....	30
2.5	Mezcla de textiles.....	31
2.5.1	Pirólisis de la mezcla de textiles.....	31
2.5.2	Gasificación de la mezcla de textiles.....	31
2.5.3	Torrefacción de la mezcla de textiles.....	33
2.5.4	Carbonización hidrotermal de la mezcla de textiles	34
2.6	Resumen.....	35
3	Simulación de una gasificación de textiles.....	36

3.1	Programa de simulación.....	36
3.2	Procedimiento de cálculo.....	36
3.3	Resultados	38
3.3.1	Gasificación del algodón	38
3.3.2	Gasificación del poliéster	39
3.3.3	Gasificación de vaqueros.....	41
3.4	Comparación de los resultados.....	42
3.4.1	Temperatura de gasificación	42
3.4.2	Composiciones de gases a la salida.....	43
3.4.3	Caudal de gas a la salida.....	44
4	Conclusiones.....	45
5	Bibliografía	46
6	Anexos.....	50
6.1	Anexo I: Programa EES: Simulación de una gasificación	50
6.2	Anexo II: Tablas correspondientes a los resultados del programa EES para la gasificación de las diferentes fibras y materiales.....	56
6.3	Anexo III:.....	60
6.3.1	Gasificación de la viscosa	60
6.3.2	Gasificación de la lana	61
6.3.3	Gasificación de la mezcla de textiles.....	62

Índice de Figuras

Figura 1-	Tabla informativa de la producción textil de España en 2013 [3].....	10
Figura 2-	Representación de las fibras en el mercado en 2014 [6].....	11
Figura 3-	Problemas de la industria textil [1]	12
Figura 4-	Diferencias entre economía circular y lineal [5]	13
Figura 5-	Reactor horizontal para la pirólisis de algodón [4]	19
Figura 6-	Esquema del proceso de gasificación en bucle [22]	20
Figura 7-	Instalación de la gasificación en bucle [22].....	21
Figura 8-	Análisis elemental del algodón antes y tras la torrefacción	22
Figura 9-	Mecanismo de la carbonización en textiles de algodón para los diferentes tensioactivos [18]	23
Figura 10-	Reactor utilizado para la gasificación del poliéster [23]	25
Figura 11-	Análisis elemental de la mezcla de poliéster y algodón antes y tras la torrefacción [21]	27
Figura 12-	Análisis elemental de la viscosa antes y tras la torrefacción	28
Figura 13-	Conversión del carbono durante el tiempo en la gasificación de lana. [28].....	30
Figura 14-	Análisis Elemental de la mezcla de lana y acrílico (1:1) antes y tras la torrefacción .	30
Figura 15-	Análisis elemental antes y después de la pirólisis [29]	31

Figura 16- Análisis elemental de los residuos textiles antes y después de la torrefacción.	33
Figura 17- Productos obtenidos tras la carbonización de los residuos textiles en diferentes condiciones. [31]	34
Figura 18- Gasificación del algodón: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico.....	38
Figura 19- Gasificación del algodón: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico	39
Figura 20- Gasificación del poliéster: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico.....	39
Figura 21- Gasificación del poliéster: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico	40
Figura 22- Gasificación de vaqueros: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico.....	41
Figura 23- Gasificación de vaqueros: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico	41
Figura 24- Comparación de temperaturas de gasificación para los textiles	42
Figura 25- Comparación de los caudales de gas a la salida.....	44

Índice de tablas

Tabla 1- Estudios sobre el procesado termoquímico con fibra de algodón.....	16
Tabla 2- Estudios sobre el procesado termoquímico con fibra de poliéster	17
Tabla 3- Estudios sobre el procesado termoquímico con fibra de viscosa	17
Tabla 4- Estudios sobre el procesado termoquímico con fibra de lana.....	18
Tabla 5- Estudios sobre el procesado termoquímico con mezcla de textiles	18
Tabla 6- Gasificación de algodón. Volumen de cada componente y conversión de carbono en función de la relación estequiométrica del proceso [22].....	21
Tabla 7- Porcentaje de masa de los productos obtenidos en la pirólisis de poliéster [24]	25
Tabla 8- Rendimientos en % volumen de los gases permanentes para la gasificación de poliéster	26
Tabla 9- Composición en g/kg en base seca de los compuestos aromáticos en la gasificación de poliéster	26
Tabla 10- Rendimientos en %vol de los gases permanentes para la gasificación de la mezcla..	32
Tabla 11- Composición en g/kg en base seca de los compuestos aromáticos en la gasificación de poliéster	32
Tabla 12- Resultados de la Torrefacción de desechos no reciclables (Torrcoal) [30]	34

1 Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 La producción de los textiles y su importancia en la economía

Los textiles siempre han estado muy presentes en la vida de los seres humanos y han ido evolucionando a la vez que lo hacíamos nosotros. Con el tiempo, se fueron creando textiles más elaborados y complejos hasta nuestros días, en la cual contamos con una gran variedad de tipos de ellos.

Actualmente, la industria textil mueve millones de dólares. En concreto, el valor de la industria mundial de la moda es de 3000 billones de dólares americanos, lo que supone el 2% del producto interno bruto mundial, e indica que se trata de un sector muy relevante para la economía. [1]

La producción de este tipo de industria es muy importante. Así, en 2018, la producción textil mundial fue de 105 millones de toneladas métricas y actualmente sigue subiendo cada vez más. A modo de ejemplo, en las dos últimas décadas se ha duplicado la producción, es decir, si antes el consumo anual mundial promedio por persona era de 7kg, actualmente corresponde a 13kg. [1][2]

Por lo que se refiere a España, el “Cityc” (Centro de Información Textil y de la Confección) proporciona elementos informativos necesarios sobre el desarrollo del sector textil-confección. En la Figura 1, se presenta una tabla sobre la producción textil de España en el año 2013. Se observa que la industria textil representó en ese año el 6% de empleo, el 3% de la producción y el 7% de la exportación industrial. [3]

SPANISH TEXTILE / CLOTHING SECTOR 2013

GENERAL FACTS

	2009	2010	2011	2012	2013	UNITS	SOURCE
Industrial Production							
Textile	-20,9	7,1	-2,4	-4,3	1,1	% Year /Year	INE
Clothing	-19,7	-10	-12,2	-4,2	3,6	% Year /Year	INE
Fibre Consumption							
Industrial consumption	275	318	310	305	329,8	000 MT	CITYC
Final Consumption	764	841	827	889	705,8	000 MT	CITYC
Per capita	16,3	17,9	17,5	14,6	15,1	Kg./pers.	CITYC
Industrial Employment							
Employment	163,4	153,3	146,1	136	129	000	CITYC
Imports							
Fibres	220	269	293	255	355	Millions €	Customs Dept.
Textiles	2.830	2.999	3.178	2.960	3.087	Millions €	Customs Dept.
Knitwear & Clothing	8.945	10.037	11.195	10.303	10.771	Millions €	Customs Dept.
Total	11.795	13.305	14.666	13.518	14.213	Millions €	Customs Dept.
Exports							
Fibres	112	119	174	171	175	Millions €	Customs Dept.
Textiles	2.547	2.805	3.030	3.035	3.198	Millions €	Customs Dept.
Knitwear & Clothing	5.162	5.820	6.362	7.217	8.333	Millions €	Customs Dept.
Total	7.821	8.544	9.566	10.423	11.706	Millions €	Customs Dept.
Industrial Prices							
Textile	0,4	2,4	3,4	0	0,6	% Dec / Dec	INE
Clothing	-0,2	0,1	0	0	-1,7	% Dec / Dec	INE
Consumer Prices							
General	0,8	3	2,4	2,9	0,3	% Dec / Dec	INE
Clothing	-0,8	0,6	0,3	0,3	0	% Dec / Dec	INE

SPANISH TEXTILE / CLOTHING SECTOR

	2009	2010	2011	2012	2013
Companies	11.853	10.415	9.389	8.878	8.471
Employment (000)	163	153	146	136	129
Turnover (Millions €)	11.288	11.108	10.782	9.703	9.363
Imports (Millions €)	11.795	13.305	14.666	13.518	14.213
Exports (Millions €)	7.821	8.544	9.566	10.423	11.706
Trade Balance (Millions €)	-3.974	-4.761	-5.100	-3.095	-2.507
Exp / Imp ratio (%)	66	64	65	77	82,4

Textile/Clothing sector represents 6% of employment, 3% of production and 7% of industrial exports in 2013

Figura 1- Tabla informativa de la producción textil de España en 2013 [3]

El sector textil ocupa un lugar fundamental en la economía de España, contando con más de 8400 empresas, dando lugar a gran cantidad de empleo. Es el quinto país de Europa con mayor producción textil, después de Alemania, Italia, Reino Unido y Francia. [3][4]

1.1.2 Materiales textiles

Las prendas de ropa están hechas de unas materias primas que son las fibras textiles. Las fibras se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Las fibras naturales son las más adecuadas y respetuosas para el medio ambiente. Las más habituales son la lana y la seda (fibras proteicas), el algodón, el lino y el cáñamo (celulosa).
- Las fibras regeneradas, las cuales se crean a partir de polímeros naturales y son fibras como el rayón, la viscosa y acetato (fibras semisintéticas).
- Las fibras sintéticas, que provienen de la industria petroquímica y son el poliéster y el nylon. Son las más abundantes en los residuos textiles (alrededor del 69%). Su

fabricación usa mucha más cantidad de energía y CO₂ que las fibras naturales. Además, no son biodegradables y son más perjudiciales que los plásticos. Sin embargo, son fáciles de reciclar y pueden descomponerse químicamente en sus componentes químicos básicos y más tarde fundirse en nuevas fibras con propiedades muy buenas. [2][5]

Las fibras textiles que más se fabrican a nivel mundial son el poliéster y el algodón, ocupando un 82% de la producción mundial. Además, China es con diferencia su mayor productor con respecto a los demás países. [4]

En la Figura 2 se representa la comparación de la cantidad de fibras textiles presentes en el mercado en el año 2014, donde se puede observar que una gran parte representa la cantidad de las fibras sintéticas seguido del algodón.

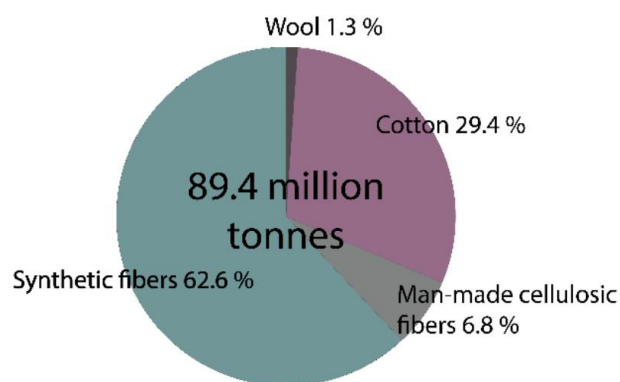


Figura 2- Representación de las fibras en el mercado en 2014 [6]

1.1.3 Los grandes problemas de su producción y los residuos generados

Si bien los textiles son necesarios, y su producción y comercialización genera efectos beneficiosos en la sociedad, sigue teniendo problemas de generación de residuos que todavía es preciso resolver. [1]

El principal problema de esta industria es el medioambiental, por lo que el aumento de producción tiene un gran impacto sobre el mismo. No solo su producción tiene un efecto perjudicial al medioambiente (por el consumo de petróleo, carbono y agua), sino que además sólo una pequeña parte de los residuos que se crean en el sector se reciclan actualmente, de modo que un alto porcentaje acaba en vertederos. [2]

Con respecto al problema de la producción de residuos, según la ONU, la industria de la moda produce al año más del 8% de los gases de efecto invernadero y el 20% de las aguas residuales (por la contaminación global del agua debido al teñido y acabado durante la producción) lo que acaba perjudicando no solo al medioambiente sino también a nuestra salud. A modo de ejemplo, en un estudio realizado por la ONU acerca de los litros de agua necesarios para fabricar unos vaqueros, se obtuvo un valor de 7.500L, lo que supone al año que se empleen 93.000 millones de metros cúbicos de agua en la producción esta prenda, suficiente para satisfacer las necesidades de cinco millones de personas. Se utilizan también alrededor de medio millón de toneladas de microfibras, lo que equivale a 3 millones de barriles de petróleo. Después de la

industria petrolera, la producción textil es la siguiente industria más contaminante actualmente. [7][5]

Adicionalmente, la ONU estima que el 85% de los textiles terminan en vertederos o se incineran, es decir, tan solo el 15% de los residuos textiles se reciclan. También se comparó los residuos creados con las dimensiones de un camión: “Cada segundo se tira al vertedero o se quema el equivalente a un camión de basura lleno de tejidos” [7].

Analizando las consecuencias negativas de los residuos producidos en la industria textil, a parte del espacio generado por los vertederos, contribuyen al cambio climático, generan emisiones de gases (lo que contribuye al efecto invernadero), y de microplásticos y microtextiles que acaban en océanos, provocando grandes daños en la flora y fauna marina. [2][8]

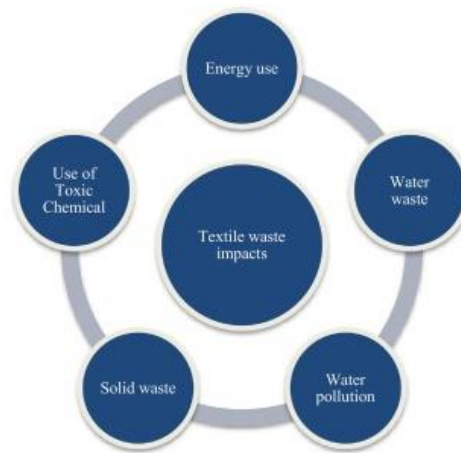


Figura 3- Problemas de la industria textil [1]

Adicionalmente, estos últimos años se está desarrollando cada vez más la “moda rápida” que consiste en una gran demanda y oferta de ropa barata y de moda de baja calidad, con precios muy asequibles y de moda o tendencia de cada año. Esto tiene como consecuencia una aceleración de la cantidad de ropa comprada y por lo tanto un gran aumento de la velocidad de producción. Algunos países asiáticos (como China) son los que más colaboran en la producción de esta moda rápida. Por ello, surge la necesidad de controlar esta tendencia y desarrollar como solución una economía que mire más por el medioambiente y la sostenibilidad. [5][4]

1.1.4 Objetivos que presentan en la actualidad la industria textil

Este objetivo que se ha planteado la industria textil de la reducción de su efecto sobre el medioambiente se puede encuadrar dentro de los “Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU” en concreto en el número 12.5: De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización. [9]

Por otra parte, el Ministerio para la transición ecológica del Gobierno de España en la Directiva 851/2018 establece un objetivo de reciclado a 2030 del 60% de los residuos municipales y del 65% en 2035. También establece plazos para la recogida selectiva obligatoria de determinados flujos como los residuos orgánicos y los textiles, entre otros. [10]

1.1.5 La solución más sostenible: Economía circular

La solución más adecuada para alcanzar la sostenibilidad de este sector está en la economía circular, que consiste en: reducir, reutilizar y reciclar. Actualmente, la industria textil se encuentra alejada de esta idea, presentando una economía que es, básicamente, lineal, que se basa en: fabricación, uso y eliminación (ver Figura 4). Más del 68% de las fibras se obtienen de recursos no renovables que además luego terminan en vertederos o se incineran. Por ello, es necesario encaminarla hacia una economía circular, cuya base es mantener el valor del textil mientras sea posible y reutilizarlo para generar nuevos productos o reciclando cuando ya no sean aptos, mirando mucho más por el medioambiente y la sostenibilidad [2][1][5].

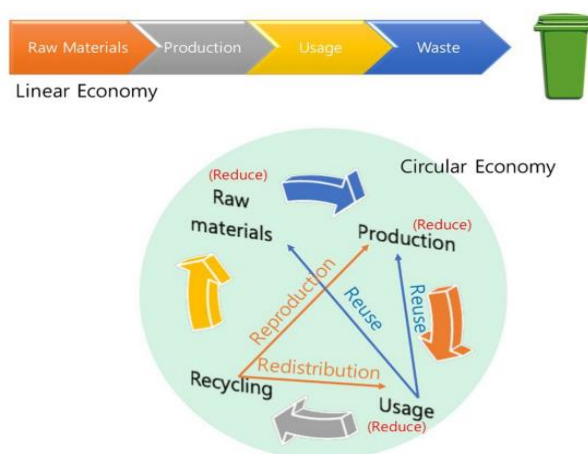


Figura 4- Diferencias entre economía circular y lineal [5]

Dentro de las alternativas planteadas para la eliminación de residuos, la primera y la que resulta más beneficiosa es reducir el consumo, lo que conlleva una reducción no solo de la producción sino también de los residuos. Es la única con visión de cero emisiones y cero daños al medioambiente que por sí misma es muy difícil llevar a cabo pero que si se tiene en cuenta puede ayudar mucho. Para ello, lo más importante es la concienciación de los consumidores.

Cuando los textiles ya no son aptos para la reutilización, es posible crear un nuevo ciclo de vida para ellos a través del reciclaje. Alemania es uno de los países que más recolecta los textiles para reutilizarlos, hasta un 75%. Estos suelen ser exportados a países de bajo desarrollo. [2][5][11]

Se suele recolectar la ropa en contenedores específicos para que después puedan ser clasificados según su calidad en las que se pueden reutilizar y las que no para poder reciclarlas si es posible.[4] En España en 2019, según el “Instituto Nacional de Estadística”, se recolectaron 47.258 residuos textiles, y se observa un incremento a lo largo de los años que presentan las estadísticas. El total de residuos urbanos recolectado en ese año fue de 22.784.752. [12]

Además, la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, establece que es obligatoria la recolección de materiales textiles después del consumo para que sean reciclados o reutilizados y la prohibición de depósito en vertederos.[13]

Por lo tanto, el reciclaje es la tercera y última opción dentro de las ideas sostenibles. Sin embargo, tan solo el 1% de los residuos textiles se puede reciclar convirtiéndose en ropa ya que

los procesos de reciclaje son agresivos, por lo que estos materiales se degradan. No obstante, se pueden reciclar y convertirse en materiales como paños, alfombras, rellenos de almohada... [5]

Un proceso muy común para el reciclaje se basa en triturar los textiles para obtener una borra y así fabricar hilo. También es posible crear materiales de una calidad inferior o materiales de relleno. [4]

Debido a las diferentes fibras que normalmente tienen los productos textiles y que aparecen en los residuos, sus características y sus estructuras complicadas muchas veces resulta complicado el proceso del reciclado. Separar las fibras es lo más difícil del reciclaje y actualmente hay una falta de conocimientos y procesos para ello, resultando ser un gran desafío. [2][5]

A parte de esta gran dificultad de separar los textiles, podemos encontrar otros problemas como la falta de tecnologías de reciclaje, el gran costo que implica el proceso de recuperación, además de su logística costosa, la escasez de plantas de procesamiento en la actualidad, y por último la baja calidad que se obtiene como producto final. Por ello, es necesario investigar mucho más para crear procesos más eficaces que puedan superar todos estos inconvenientes. [2]

1.1.6 Una alternativa al reciclaje tradicional

Para aquellos materiales textiles complejos, en los que no es posible llevar a cabo procesos de reciclado de forma sencilla, es posible realizar una valorización termoquímica de los mismos que puede permitir obtener energía o productos químicos de valor añadido.

En este Trabajo de Fin de Grado, se va a estudiar esta alternativa para la valorización de los residuos textiles.

Estos procesos termoquímicos se llevan a cabo a altas temperaturas, aunque las condiciones de trabajo concretas dependen del tipo de tratamiento. Los que se van a considerar son: pirólisis, gasificación, torrefacción y carbonización. En todo caso, existen otros procesos termoquímicos que pueden resultar interesantes para los residuos textiles, como la combustión, que no se tratarán en este trabajo.

- La **gasificación** es un proceso termoquímico en el cual se lleva a cabo una oxidación parcial del material alimentado con cantidades inferiores de O_2 a las necesarias. Se suele llevar a cabo normalmente a temperaturas superiores a $750\text{ }^\circ\text{C}$.

Los productos formados en este proceso son:

- **Gas de síntesis:** Se crea por la combustión parcial que se crea en la gasificación con defecto de aire. Está formado por CO , H_2 , CO_2 , N_2 (en el caso de que se use aire) y CH_4 . También se forma en menor proporción otras sustancias como alquitrán y compuestos halógenos.
- **Residuo sólido:** Está formado por materiales no combustibles e inertes. Suele contener el carbono que no se ha gasificado. [14][4]

A parte del aire u oxígeno, es posible utilizar otros gases como agentes gasificantes, como el H_2 o el CO_2 .

- La **pirólisis** se basa en una degradación térmica de la sustancia tratada. Normalmente se realiza en ausencia de O_2 y los materiales se descomponen mediante calor, sin presentar reacciones de combustión. La temperatura de reacción suele ser inferior a la de gasificación, entre 300 y $800\text{ }^\circ\text{C}$. Se suele emplear este proceso para residuos,

provocando la disminución de su volumen y a la vez se obtienen combustibles con buenas propiedades. Los productos que se general son:

- Gases: Estos son H_2 , CH_4 , C_2H_6 , CO , CO_2 y compuestos más volátiles. Tiene un gran parecido al gas de síntesis generado durante la gasificación, pero con mayor cantidad de productos líquidos por su temperatura de reacción inferior.
 - Productos líquidos: Son hidrocarburos de cadenas largas como alquitranes, aceites, fenoles, ceras que se crean al condensar a la temperatura ambiente.
 - Producto carbonoso: Estos están formados por materiales no combustibles, metales pesados y componentes inertes presentes en los residuos. [4][14]
- La **torrefacción** es un proceso similar a la pirolisis, pero en condiciones más suaves, con una temperatura entre 180 y 250 °C en una atmosfera inerte [15]. Mientras que se calienta lentamente, se liberan los compuestos volátiles, a la vez que se descompone el material alimentado. Se obtiene un producto torrefactado y seco que es estable, quebradizo y más sencillo de triturar que el material original. [16]
En muchos casos, este proceso se utiliza para densificar energéticamente los residuos de forma previa a su transporte, o como etapa previa de otros procesos termoquímicos.
- La **carbonización** es un método simple de pirólisis para preparar materiales de alta densidad energética a temperaturas inferiores. Durante su proceso, no consume mucha energía y consigue una temperatura de reacción considerablemente baja (entre 180 y 350 °C) y una buena eficiencia de conversión. Convierte las materias primas en hidrocarburos mediante hidrólisis, deshidratación, descarboxilación, polimerización y aromatización. Se obtienen productos con características muy similares a los combustibles. [17][18]

1.2 Objetivos del trabajo

En este Trabajo de Fin de Grado, se van a estudiar los procesos termoquímicos nombrados para los residuos textiles. Para ello, Inicialmente se realizará un análisis detallado del estado del arte de estos procesos para diferentes fibras (algodón, poliéster, lana, viscosa y mezcla de fibras) y se estudiarán sus comportamientos.

Después se elaborará una aplicación en EES en la que se incorporará un modelo para la simulación de gasificación para algunas fibras textiles. Esta permitirá determinar el comportamiento que presentará y los productos que se obtendrá para las fibras propuestas o mezclas de estas.

Finalmente se analizarán los resultados obtenidos de esta aplicación para la gasificación de fibras, mezclas y prendas de ropa.

2 Estudios de los procesos termoquímicos en las diferentes fibras

Como se ha comentado, inicialmente se realizó una exhaustiva búsqueda bibliográfica. En las Tablas 1, 2, 3, 4 y 5 se presenta la principal información encontrada en la bibliografía científico/técnica sobre el procesado termoquímico de los diferentes textiles: algodón, poliéster, viscosa, lana y mezcla (respectivamente), y en los que se ha basado el análisis de la situación actual del procesado termoquímico de estos materiales. En las tablas se muestra el nombre del artículo del que se ha obtenido la información, sus respectivos autores y algunas características relevantes de su proceso. A lo largo de este trabajo, se irán analizando estos artículos y se presentará la información más importante (tanto de su proceso como de sus productos).

- Algodón:

Tabla 1- Estudios sobre el procesado termoquímico con fibra de algodón

Proceso	Artículo	Referencia	Condiciones de operación			Autores	Año
			Temperatura	Catalizadores	Tiempo		
Pirólisis	A study of pyrolysis and pyrolysis products of flame-retardant cotton fabrics by DSC, TGA, and PY-GC-MS	[19]	600°C	Retardantes de llama		P. Zhu, S. Sui, B. Wang, K. Sun, and G. Sun	Febrero de 2021
Pirólisis	Mechanical properties of waste cotton and their changes during early pyrolysis	[20]	Entre 25 y 250°C (velocidad = 5°C /min)			A. Batuer, D. Chen, Q. Xin, X. He, J. Zhang, and Z. Huang	Enero de 2021
Pirólisis	Descomposición térmica de residuos textiles. Estudio cinético y formación de contaminantes	[4]	Entre 80 y 700°C (velocidad = 5, 10, 20°C /min)			J. Moltó Berenguer	2007
Torrefacción	Production of biochars from textile fibres through torrefaction and their characterisation	[21]	300°C, 350°C y 400°C (velocidad= 10 °C/min)	-	1h	A. Hanoğlu, A. Çay, and J. Yank	Enero 2019
Gasificación	Methanol solution promoting cotton fiber chemical looping gasification for high H ₂ /CO ratio syngas	[22]	850°C			W. Qin, S. Chen, B. Ma, J. Wang, J. Li, R. Liang, Z. Xu, L. Liu, C. Dong and H. Zhang	Marzo de 2019
Carbonización hidrotérmica	Conversion of cotton textile waste to clean solid fuel via surfactant-assisted hydrothermal carbonization: Mechanisms and combustion behaviors	[18]	230°C (velocidad = 5°C /min)	H ₂ SO ₄	120min	Z. Xu, R. Qi, M. Xiong, D. Zhang, H. Gu, and W. Chen	Diciembre de 2021
Carbonización hidrotérmica	Clean solid fuel produced from cotton textiles waste through hydrothermal carbonization with FeCl ₃ : Upgrading the fuel quality and combustion characteristics	[17]	200, 220, 240 y 260 °C (velocidad = 5°C /min)	FeCl ₃	1, 2, 4 y 6 horas	R. Qi, Z. Xu, Y. Zhou, D. Zhang, Z. Sun, W. Chen and M. Xiong	Enero 2021

- **Poliéster:**

Tabla 2- Estudios sobre el procesado termoquímico con fibra de poliéster

Proceso	Artículo	Referencia	Condiciones de operación		Autores	Año
			Temperatura	Tiempo		
Torrefacción	Production of biochars from textile fibres through torrefaction and their characterisation	[21]	300°C, 350°C y 400°C (velocidad = 10 °C/min)	1h	A. Hanoğlu, A. Çay, and J. Yanık	Agosto de 2018
Gasificación	Valorisation of textile waste via steam gasification in a fluidized bed reactor	[23]	650, 750 y 850°C		I. Cañete Vela, J. Maric, and M. Seemann	2019
Pirólisis y gasificación	Thermochemical textile recycling: Investigation of pyrolysis and gasification of cotton and polyester	[24]	Entre 510 y 630°C		J. Rittfors	2020
Pirólisis	Descomposición térmica de residuos textiles. Estudio cinético y formación de contaminantes	[4]	Entre 80 y 700°C	Velocidades: 5, 10, 20°C /min	J. Moltó Berenguer	2007

- **Viscosa:**

Tabla 3- Estudios sobre el procesado termoquímico con fibra de viscosa

Proceso	Artículo	Referencia	Condiciones de operación			Autores	Año
			Temperatura	Catalizadores	Tiempo		
Carbonización hidrotermal	A comparative study of carbon microsphere preparation by the hydrothermal carbonization of waste cotton fibers, viscose fibers and Avicel	[25]	260°C	H ₂ SO ₄ , ácido acético y sales inorgánicas (AlCl ₃ , CaCl ₂ , LiCl, MgCl ₂)	8 h	Y. F. Zhang, J. M. Dai, H. Guo, S. Shi, Z. F. Yan, and W. S. Hou	Junio 2020
Pirólisis	Investigation on the reaction kinetics, thermodynamics and synergistic effects in co-pyrolysis of polyester and viscose fibers	[26]	Desde 40°C hasta 800°C	-		H. Peng, P. Li, and Q. Yang	Enero 2022
Torrefacción	Production of biochars from textile fibres through torrefaction and their characterisation	[21]	300°C, 350°C y 400°C (velocidad= 10 °C/min)	-	1h	A. Hanoğlu, A. Çay, and J. Yanık	Enero 2019

- **Lana:**

Tabla 4- Estudios sobre el procesado termoquímico con fibra de lana

Proceso	Artículo	Referencia	Condiciones de operación		Autores	Año
			Temperatura	Tiempo		
Pirólisis	Detection and kinetic simulation of animal hair/wool wastes pyrolysis toward high-efficiency and sustainable management	[27]	Hasta 900°C	-	X. Sun, Z. Zhu, F. Zaman, Y. Huang, and Y. Guan	Julio de 2021
Pirólisis y gasificación	The pyrolysis and gasification performances of waste textile under carbon dioxide atmosphere	[28]	Pirólisis: 300°C - 500°C Gasificación: 800-1000°C		C. Wen, Y. Wu, X. Chen, G. Jiang, and D. Liu	Octubre del 2016
Torrefacción	Production of biochars from textile fibres through torrefaction and their characterisation	[21]	300°C, 350°C y 400°C (velocidad= 10 °C/min)	1h	A. Hanoğlu, A. Çay, and J. Yanık	Agosto de 2018

- **Mezcla de textiles:**

Tabla 5- Estudios sobre el procesado termoquímico con mezcla de textiles

Proceso	Artículo	Referencia	Condiciones de operación			Autores	Año
			Tª	Catalizador	Tiempo		
Pirólisis	A sustainable bioenergy conversion strategy for textile waste with self-catalysts using mini-pyrolysis plant	[29]	800 °C (a 10 °C/min)	Metales pesados	-	S. Yousef, J. Eimontas, N. Strugas, M. Tatariants, M. Ali, S. Tuckete and L. Kliucininkas	Septiembre de 2019
Torrefacción	Torrefaction of textile waste for production of energy-dense biochar using mass loss as a synthetic indicator	[8]	225, 250, 275 y 300 °C (a 15 °C/min)	-	1 y 3 h	Y. P. Rago, D. Surroop, and R. Mohee	Febrero de 2018
Gasificación	Valorisation of textile waste via steam gasification in a fluidized bed reactor	[23]	650, 750 y 850°C	-		I. Cañete Vela, J. Maric, and M. Seemann	2019
Carbonización hidrotermal	A Mechanism Study on Hydrothermal Carbonization of Waste Textile	[31]	230 y 280°C	-	30 y 90 minutos	Y. Lin, X. Ma, X. Peng, and Z. Yu	Septiembre 2016

2.1 Fibra de algodón

2.1.1 Pirólisis de la fibra de algodón

En un estudio realizado por *J. Moltó Berenguer* en 2007 [4], se realizaron experimentos de pirólisis con aproximadamente 5mg de tela cortada de algodón. Las reacciones se llevaron a cabo a diferentes velocidades: 5, 10, 20 °C/min, en una atmosfera inerte con helio. Se introdujo un flujo de gas de 60ml/min y los experimentos se estudiaron a temperaturas entre 80 y 700°C.

La reacción de pirólisis se llevó a cabo en un reactor horizontal de cuarzo, como el que se presenta en la Figura 5.

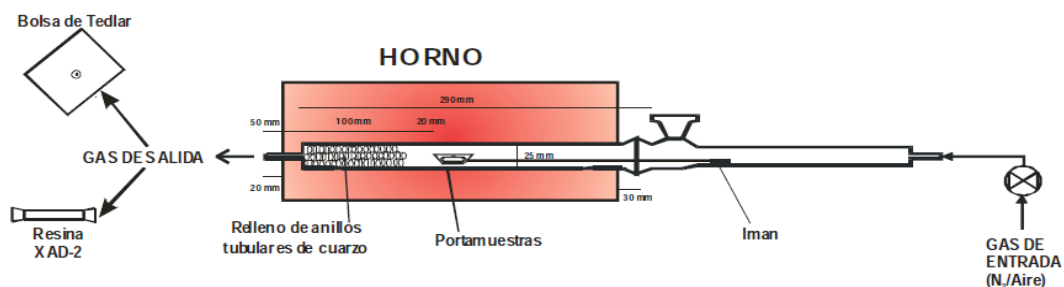
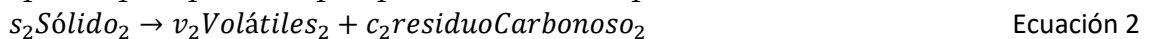
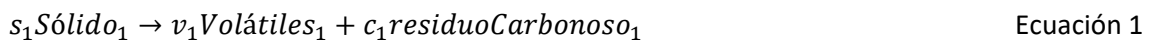


Figura 5- Reactor horizontal para la pirólisis de algodón [4]

También se estudió la diferencia entre la pirólisis y la combustión (es decir en presencia de oxígeno) y se afirmó que en presencia de oxígeno la descomposición térmica se aceleraba, necesitando menos temperatura y obteniendo mucha menos cantidad de residuo.

Se propuso un modelo cinético para esta pirólisis. El algodón se dividió en dos fracciones independientes, una mayoritaria y otra minoritaria:



De esta manera se obtienen de cada fracción volátiles (formado por los gases) y un residuo carbonoso. Los volátiles que se obtuvieron fueron: CO₂, CO, CH₄, eteno y benceno. También se obtienen compuestos semivolátiles como el naftaleno, acenaftileno y estireno.

En un estudio realizado por *P. Zhu, et al. (2004)*, se presentaron las etapas de la pirólisis de la celulosa (relacionado con las fibras de algodón): [19]

- Pirólisis inicial: Se produce a temperaturas de entre 80 y 300°C. Surgen cambios de alguna propiedad física y una pequeña pérdida de peso.
- Pirólisis principal: En esta etapa, ocurre una pérdida de peso mucho más rápida y se obtienen la mayor parte de los productos. Tiene lugar en el rango de temperaturas de 300 a 400°C.
- Pirólisis de char: Ocurre a temperaturas superiores de 400°C. Se llevan a cabo los procesos de deshidratación, carbonización. Se aumenta la producción del carbono y se forman los residuos carbonosos.

2.1.2 Gasificación de la fibra de algodón

En el siguiente artículo, realizado por *W. Qin et al (2019)* [22], se llevó a cabo una gasificación química en bucle (CLG) con la fibra de algodón, lo que optimiza mucho más el proceso y se obtienen mejores resultados que en una gasificación simple.

Si se trabaja con materias sólidas, como es la fibra de algodón, se debe usar un oxidante suficiente.

Para llevar a cabo este proceso, es necesario trabajar con un exceso de oxígeno, para favorecer la producción de gas de síntesis con alta cantidad de H₂/CO. Se realiza a una temperatura de 850°C.

La finalidad de este proceso es obtener por separado los gases combustibles y el inerte (N₂). Se consigue un gas combustible con un poder calorífico más alto (gas de síntesis) al no estar diluido.

El proceso de gasificación en bucle que realiza en dos etapas en ciclo como se muestra en la Figura 6.

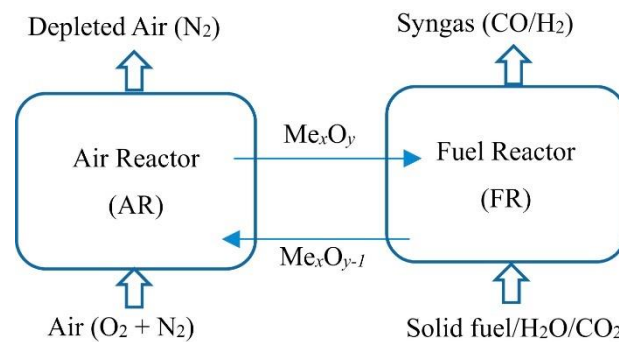


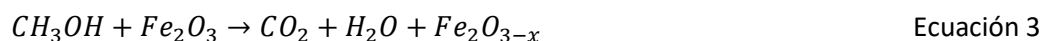
Figura 6- Esquema del proceso de gasificación en bucle [22]

Se introducen el combustible y los oxidantes en el reactor de combustible. En él, se realiza la oxidación parcial y se produce CO y H₂, que forma el gas de síntesis, a la vez que se reduce el oxidante. En nuestro caso, el oxidante más efectivo es el óxido de Fe (Fe₂O₃).

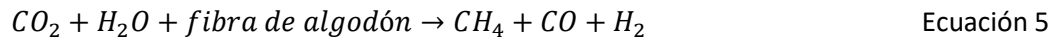
El oxidante reducido se traslada al siguiente reactor, al reactor de aire, a la vez que se introduce aire. En este reactor se oxida el oxidante reducido con el oxígeno (presente en el aire) y vuelve a su estado original, trasladándose de nuevo al reactor de combustible para el ciclo posterior.

Por otro lado, antes de introducir las fibras de algodón para su descomposición, se introduce una solución de metanol, lo cual provoca que la fibra de algodón genere un gas de síntesis con mejores propiedades. Por lo tanto, en este ciclo presenta dos etapas:

- La etapa combustión en bucle de metanol, se convierte en 95% de metanol. Sus productos permiten obtener suficiente H₂O y CO₂ para promover la siguiente etapa.



- La etapa CLG de fibra de algodón, en la que se produce el gas de síntesis con un alto contenido de H₂/CO y rendimiento.



Se presentan resultados mucho más eficaces gracias al papel que desempeña la solución del metanol. No solo mejora la reducción de los desechos de la fibra de algodón, sino que también proporciona unos productos con un alto contenido de energía.

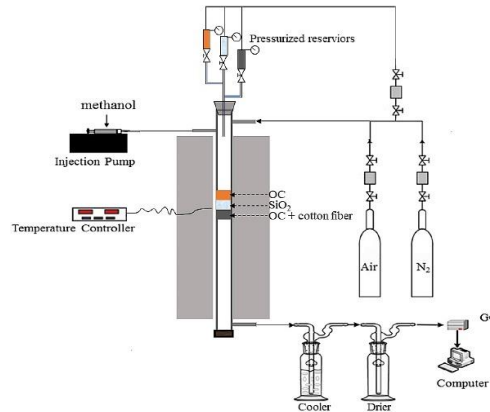


Figura 7- Instalación de la gasificación en bucle [22]

En la Tabla 6 se presentan los resultados que se obtuvieron en la gasificación de algodón para diferentes valores de porcentaje de oxígeno respecto del estequiométrico (ER). Se observa que al aumentarlo, el volumen de hidrógeno primero aumenta y después disminuye. Sin embargo, los volúmenes de CO y CH₄ disminuyen siempre con el aumento de este porcentaje, y por lo tanto el volumen de CO₂ aumenta.

Tabla 6- Gasificación de algodón. Volumen de cada componente y conversión de carbono en función de la relación estequiométrica del proceso [22]

ER (%)	H ₂ (ml)	CO (ml)	CO ₂ (ml)	CH ₄ (ml)	η
0	1273,12	222,48	474,04	84,09	0,84
30%	1394,03	204,33	558,9	75,52	0,9
50%	1273,00	128,88	596,31	33,57	0,82
70%	1066,67	121,4	600,32	32,8	0,81

2.1.3 Torrefacción de la fibra de algodón

Hanođlu et al. (2019) [21] estudiaron el proceso de torrefacción con diferentes textiles y mezclas, entre ellas la fibra de algodón y mezcla de algodón con poliéster.

Se llevó a cabo en un lecho fijo vertical a diferentes temperaturas, 300, 350 y 400°C. Se introdujo también una corriente de N₂ gaseoso. La temperatura se aumentó a una velocidad de 10°C/min y cuando alcanzó la temperatura deseada, se mantuvo constante durante 1h y finalmente se dejó enfriar.

Se observó que la principal diferencia de los productos para cada fibra o mezcla introducida estaba en la variación de la relación de densificación de energía y las propiedades del biochar producido. También observaron que la temperatura de procesado afectaba en el rendimiento de este.

Tras la torrefacción se obtuvieron diferentes productos:

- Los volátiles condensables, que se condensaban para formar los productos líquidos.
- Los volátiles no condensables (gases), que se expulsaban a la atmósfera.
- Los productos sólidos, es decir, el biochar.

Al aumentar la temperatura, el rendimiento másico del biochar disminuía, y por lo tanto también lo hacía el rendimiento energético. Para el caso del algodón (junto con la viscosa) se obtuvieron los rendimientos de biochar más bajos, pero para la mezcla de algodón con poliéster este fue mayor. Sin embargo, tanto el algodón como su mezcla con poliéster (y también la viscosa), al presentar muy bajos contenidos de nitrógeno (lo cual no sucedía con otras fibras como las acrílicas) fue muy ventajoso, ya que el nitrógeno limita las propiedades del combustible.[21]

Por otra parte, gracias a la torrefacción, para el caso del algodón, se aumentó el contenido de carbono en el algodón y disminuyó el contenido en oxígeno (ver Figura 8), de modo que también aumentó el contenido energético.

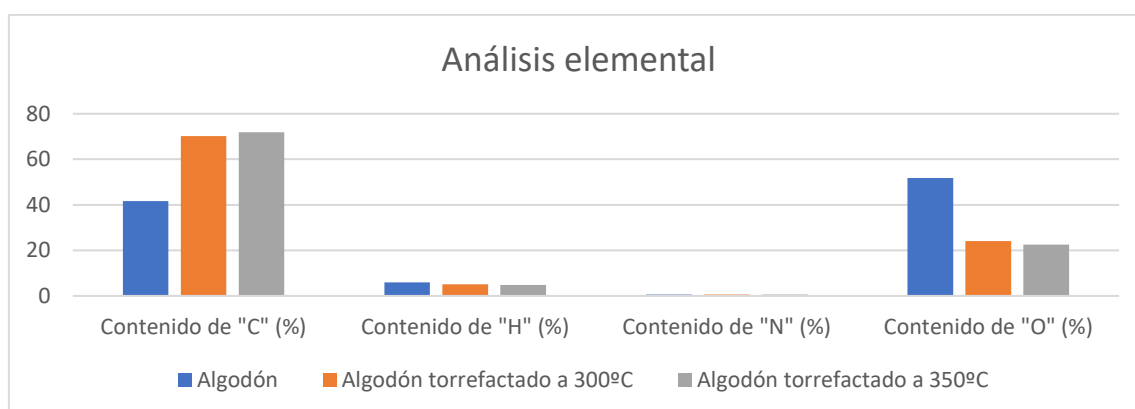


Figura 8- Análisis elemental del algodón antes y tras la torrefacción

Como conclusión del estudio, se observó que los productos de las fibras de algodón y de la mezcla de algodón y poliéster presentaban un combustible sólido con muy buenas propiedades energéticas.

2.1.4 Carbonización hidrotérmal de la fibra de algodón

Xu et al. [18] estudiaron la conversión de residuos textiles de algodón a un combustible sólido mediante la combustión hidrotérmal.

Para ello, mezclaron 3 gramos de estos textiles de algodón con el catalizador H_2SO_4 y un tensioactivo determinado. Se introdujo en el reactor y se calentó a una temperatura de $230^\circ C$ a una velocidad de $5^\circ C/min$ y se mantuvo constante durante 120 minutos y después se dejó enfriar. Después, se recogió el producto y se separó en los productos sólidos, que son los hidrocarburos, y la fase líquida de la cual se extrajo el bioaceite.

La Figura 9 representa un esquema del mecanismo de la carbonización para los textiles de algodón con los diferentes tensioactivos estudiados. Los tensioactivos catalizaban las reacciones intermedias para producir subproductos.

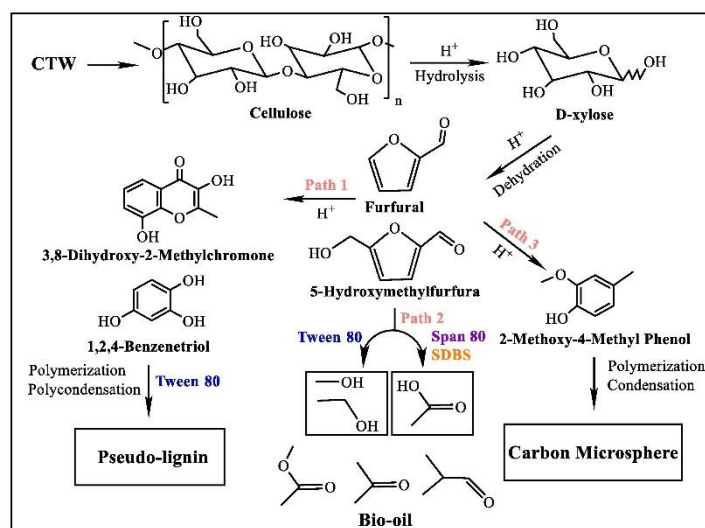


Figura 9- Mecanismo de la carbonización en textiles de algodón para los diferentes tensioactivos [18]

La celulosa de los residuos de los textiles de algodón se hidroliza en xilosa, que es un carbohidrato. Después, se lleva a cabo la hidrólisis y deshidratación en la cual se forman los productos intermedios: furfural (FF) y 5-hidrometilfurfural (HMF).

A partir de aquí, podemos encontrar diferentes caminos:

- 1) Gracias a la función del tensioactivo **Tween 80**, se producen compuestos aromáticos, los cuales se condensan y forman pseudolignina.
- 2) Se forman bioaceites. Pueden formarse con los tensioactivos **Span 80** y **SDBS**, que convierten los ácidos grasos en bioaceite, o con el tensioactivo **Tween 80** que convierten el alcohol en bioaceite.
- 3) Se obtienen microesferas de carbono mediante reacciones de policondensación.

Se observó que la pseudolignina optimizó las propiedades de combustible de los hidrocarburos, aumentando su densidad de energía. En cambio, el bioaceite redujo su rendimiento.

La pseudolignina ayudó a promover la producción de combustible sólido, los hidrocarburos, actualizando sus propiedades y obteniendo un combustible de valor añadido.

En otro artículo, realizado por R. Qi *et al.* (2021), se estudió la influencia en la carbonización hidrotermal de los textiles de algodón la influencia del catalizador FeCl₃. [17]

El FeCl₃ podría reducir la temperatura de carbonización, catalizar el proceso de deshidratación y la descarboxilación. También fomentó la conversión de furfural a pseudolignina, lo que optimiza las propiedades energéticas de los hidrocarburos. [17]

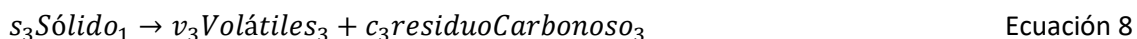
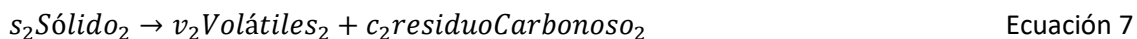
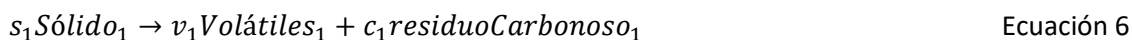
2.2 Fibra de poliéster

2.2.1 Pirólisis de la fibra de poliéster

En el mismo artículo en el que se estudió la pirólisis de la fibra de algodón, se estudió también para la fibra de poliéster (*J. Moltó Berenguer, 2007*). [4]

Se realizó un experimento con unas condiciones muy parecidas a las utilizadas para el otro material y en el mismo reactor. Se introdujeron 5mg de la tela de poliéster y un flujo de gas de 100ml/min y se trabajó a temperaturas de entre 80 y 795°C a diferentes velocidades: 5, 10, 20°C/min.

Se planteó un modelo cinético para el caso de la tela de poliéster, que consiste en tres reacciones independientes (en cambio para el algodón eran dos):



Al igual que para el algodón, se obtienen volátiles (formados por gases) y un residuo carbonoso. Los volátiles que se obtuvieron en este caso fueron principalmente benceno, aparte de CO y CO₂. También obtuvieron compuestos semivolátiles como el naftaleno, acenaftileno, bifenilo y fenantreno.

En otro trabajo, llevado a cabo por *J. Rittfors*, [24] se estudió el porcentaje de masa obtenido de los gases, líquidos y el residuo sólido (char) en el proceso de pirólisis del poliéster a unas temperaturas entre 510 y 630°C (ver Tabla 7).

Tabla 7- Porcentaje de masa de los productos obtenidos en la pirólisis de poliéster [24]

	% masa	510°C	630°C
Gas	TOTAL	37	39
	CO	23	18
	CO ₂	13	17
	H ₂	0,09	0,13
	CH ₄	0,87	1,9
	C2-C4 hidrocarburos	2,6	1,33
Líquido	TOTAL	51	50
	Hidrocarburos aromáticos	1,3	3,4
	Oxígeno conteniendo componentes	24	20
	Componentes de NaOH-soluble	24	13
Residuo sólido (char)	TOTAL	12	11

2.2.2 Gasificación de la fibra de poliéster

En la actualidad, no se encuentran disponibles muchos artículos en los que se lleve a cabo el proceso de gasificación de poliéster, pero I. Cañete Vela et. Al. [23] realizaron interesantes experimentos para la gasificación de diferentes textiles como poliéster, algodón y mezcla de textiles.

La gasificación de la fibra de poliéster presentó similares comportamientos que a los de la fibra de algodón para las mismas condiciones, pero tiene claras diferencias en la composición de sus productos. Hay que destacar la producción de compuestos aromáticos para la gasificación del poliéster junto con gas de síntesis que, en cambio, es prácticamente el único producto en el caso del algodón.

Estos experimentos se llevaron a cabo a unas temperaturas de 650, 750 y 850°C y se compararon sus resultados. Se realizó en un reactor de lecho burbujeante, como el que se representa en la Figura 10.

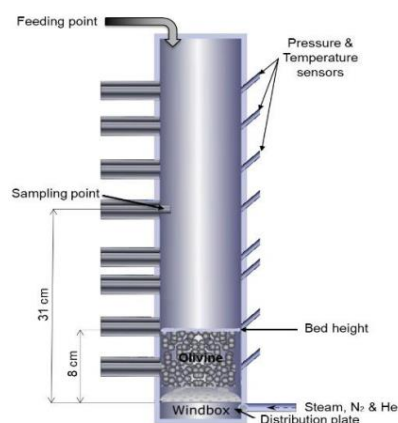


Figura 10- Reactor utilizado para la gasificación del poliéster [23]

Además, para todos los casos, se realizaron los experimentos en dos pasos con dos reactores:

- 1) Gasificador: En él se introducen 2 gramos del combustible, vapor (como gasificante) y nitrógeno (que sirve para la fluidización del lecho). Se lleva a cabo la gasificación, donde se producen los productos útiles del proceso.
- 2) Cámara de combustión: Se realiza la combustión, donde el residuo carbonoso (char) se quema y calienta el material del lecho circulante (arena).

Para el caso del poliéster, se obtuvieron dos gases: gas permanente (gas de síntesis) y compuestos aromáticos.

- **Gas permanente:**

En la Tabla 8 se presentan los rendimientos en porcentaje de volumen que se obtuvieron de los gases permanentes tras la gasificación del poliéster a diferentes temperaturas.

Tabla 8- Rendimientos en % volumen de los gases permanentes para la gasificación de poliéster

	CO ₂ (%vol)	CO (%vol)	H ₂ (%vol)	CH ₄ (%vol)
650°C	59,7	31,5	2,2	6,5
750°C	63,1	21,5	10,4	5,0
850°C	50,9	21,6	20,5	7,0

Como el poliéster presenta un alto contenido de O, se obtiene una gran cantidad de CO₂. Esto es perjudicial para la obtención de combustible y limita su producción. No solo esto, sino que también el CO₂ provoca que el poder calorífico del gas sea inferior. [24]

- **Compuestos aromáticos:**

En la Tabla 9 se presentan las composiciones de los compuestos aromáticos producidos tras la gasificación del poliéster a diferentes temperaturas.

Tabla 9- Composición en g/kg en base seca de los compuestos aromáticos en la gasificación de poliéster

	Benceno (g/kg)	Tolueno, o/p-xileno, estireno, metilestireno (1 anillo) (g/kg)	Naftalina (g/kg)	Compuestos de 2 anillos (g/kg)	Compuestos de más de 3 anillos (g/kg)	Fenoles (g/kg)
650°C	7	32	3	33	6	7
750°C	39	32,5	8	32	10	2
850°C	85	15	8	23	11	0

Comparando las cantidades totales de gases producidas, se obtuvieron de gas permanente alrededor de 0,7-0,8 kg/kg en base seca y de compuestos aromáticos alrededor de 0,1 kg/kg. Por lo tanto, la gasificación del poliéster es una buena opción para la obtención de gas síntesis y de compuestos aromáticos.[23]

2.2.3 Torrefacción de la fibra de poliéster

Para el mismo artículo en el que se estudió la torrefacción de algodón (2.1.4) (A. Hanoğlu et al., 2019) [21], también se investigó la torrefacción de la fibra de poliéster y mezclas de ella con otros textiles.

Se realizó en las mismas condiciones descritas anteriormente: el reactor era un lecho fijo vertical y se calentó a diferentes temperaturas (300, 350 y 400°C) a una velocidad de 10°C/min y se mantuvo constante durante 1h. Igualmente se introdujo una corriente de N₂ gaseoso.

Para el caso de la fibra compuesta por 100% poliéster, se concluyó que no era adecuada para obtener biochar mediante la torrefacción, ya que el poliéster presenta una alta estabilidad térmica (necesita más temperatura para descomponerse). Durante su proceso se observó que:

- Entre 300 y 350°C el rendimiento en masa del biochar fue de entorno al 93%, presentando un residuo en estado sólido petrificado. Además, a la temperatura de 370°C ocurrió la máxima pérdida de peso, lo que se debió a la liberación de H₂O, benceno y CO₂.
- A 400°C el rendimiento en masa del biochar se estimó que era alrededor del 25%, un valor muy pequeño.

Para el caso de la mezcla de fibras de poliéster y algodón se obtuvieron mejores resultados y tras su torrefacción, se obtuvo biochar con un alto contenido energético. Sin embargo, se obtuvo un menor contenido de carbono que en comparación con el que se obtenía con las fibras 100% de algodón, debido a que el poliéster no se decompone (Ver Figura 11).

Además, como ya se comentó en la sección de la torrefacción de algodón (2.1.4), esta mezcla presentaba bajo contenido de nitrógeno, lo cual es positivo, ya que el nitrógeno no colabora en la formación de un producto de valor añadido.

También se observaron diferentes etapas en la descomposición de la mezcla:

- Entre 259 y 358°C se produjo la pérdida de los compuestos volátiles, obteniéndose el char.
- Entre 384 y 446°C se oxidó el char (residuo sólido) por parte del algodón y hubo una pérdida de compuestos volátiles por parte del poliéster.
- Entre 444 y 484°C se oxidó el char por parte del poliéster.

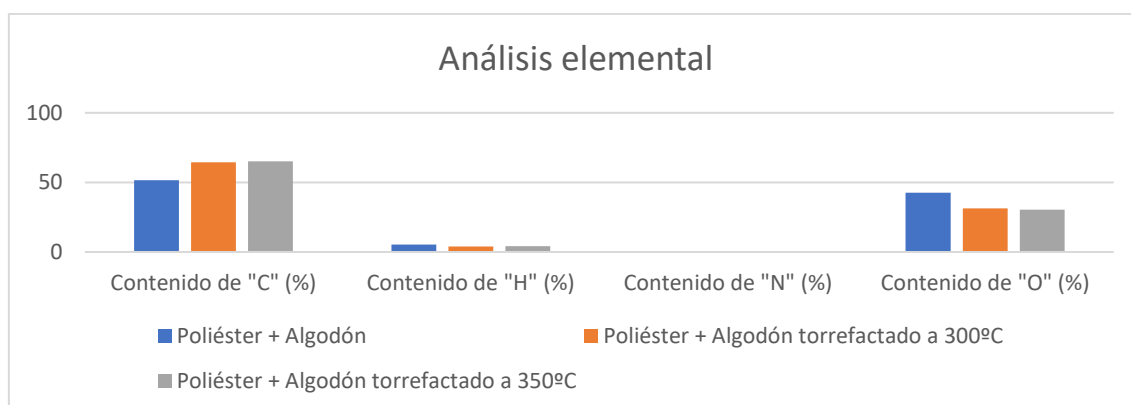


Figura 11- Análisis elemental de la mezcla de poliéster y algodón antes y tras la torrefacción [21]

2.3 Fibra de viscosa

2.3.1 Pirólisis de la fibra de viscosa

No se encuentran en la literatura científica muchos artículos acerca de la pirólisis de la fibra de viscosa, pero H. Peng et al. [26] investigaron sus reacciones tanto para la pirólisis de la viscosa como para la del poliéster y varias mezclas de ellas.

Los autores, calentaron 8-10mg de viscosa en una atmosfera de nitrógeno desde una temperatura de 40°C hasta 800°C, a diferentes velocidades: 10, 20, 30 y 40°C/min. Como resultado, se observó que el aumento de la velocidad de calentamiento producía un aumento de la temperatura. Esto se debe a que el aumento de la velocidad de calentamiento no suministra la suficiente energía para su descomposición térmica, y de esta manera se crea una histéresis térmica.

La degradación térmica de la viscosa a una velocidad de 10°C/min se produjo en el intervalo de temperaturas de entre 259 y 353°C. Además, la máxima pérdida de masa se produjo a 340°C.

2.3.2 Torrefacción de la fibra de viscosa

Para el mismo artículo en el que se estudió la torrefacción del algodón (2.1.4) y del poliéster (2.2.4) (realizado por A. Hanoğlu et al., 2019) [21], se investigó también como afectaba la torrefacción a la viscosa, y se realizó en las mismas condiciones descritas anteriormente.

Al igual que para la fibra de algodón, en la torrefacción de la fibra de viscosa se obtuvo biochar con los rendimientos de este más bajos en comparación con otros materiales estudiados, y esto se debía a su baja estabilidad térmica. En cambio, de forma similar a lo que sucede con el algodón, se aumentó el contenido de carbono en el sólido tras la torrefacción y disminuyó el contenido en oxígeno, lo que aumentó el valor energético (Figura 12).

A 300°C, se obtuvo una alta pérdida de masa de alrededor del 68%. Esto produjo una disminución del rendimiento energético del biochar obtenido.

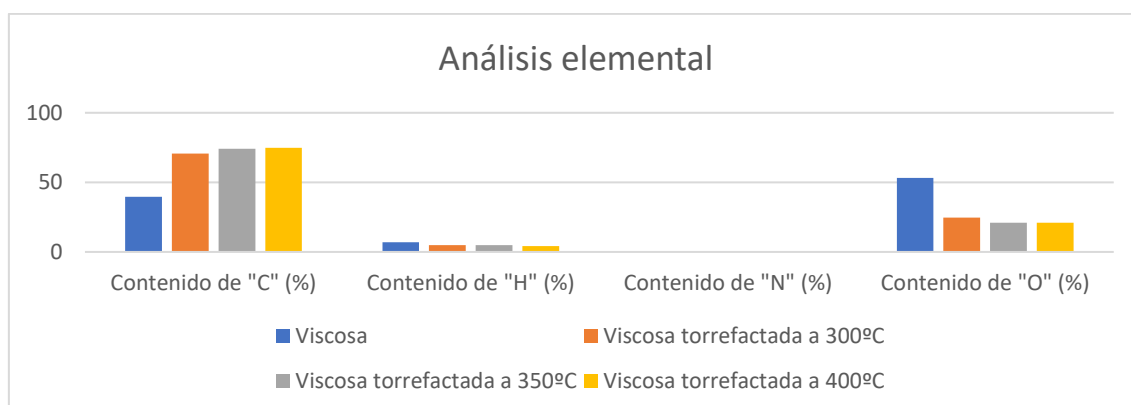


Figura 12- Análisis elemental de la viscosa antes y tras la torrefacción

2.3.3 Carbonización hidrotermal de la fibra de viscosa

En un estudio realizado por *Y. F. Zhang et al. (2020)* [25] se analizó la carbonización hidrotermal de diferentes residuos textiles: algodón y viscosa.

Para el caso de la viscosa, debido a que presenta una baja cristalinidad, se descompuso en condiciones moderadas, concretamente en el estudio realizado, a 260°C y 8h. Sin embargo, se obtuvo un producto con menores cantidades de carbono que en comparación con el algodón a pesar de que se descomponga a temperaturas mayores.

2 Fibra de lana

2.4.1 Pirólisis de la fibra de lana

En el artículo realizado por *X. Sun et al. (2021)* [27] se estudió la pirólisis de los residuos de pelo/lana proveniente de animales.

Al presentar una alta cantidad de carbono, eran muy buenos candidatos para obtener combustible con buenas propiedades energéticas durante la pirólisis.

Tras el proceso de pirólisis de lana se obtuvieron los productos, la mayoría volátiles: fenoles y compuestos heterocíclicos. Estos pueden ser utilizados como bioenergía o también se pueden transformar en compuestos químicos que sean eficaces.

2.4.2 Gasificación de la fibra de lana

C. Wen et al. (2017) [28], publicaron un trabajo en el cual se compara la pirólisis y la gasificación de diferentes fibras: algodón, poliéster y lana.

Para el caso de la gasificación se realizó, para todas las fibras, en las mismas condiciones. Se llevó a cabo a una velocidad de 50°C/min a una temperatura de entre 800 y 1000°C. Se introdujo a la vez un flujo de gas de nitrógeno de 500mL/min y luego un flujo de CO₂ del mismo caudal.

Se obtuvo que la variación de masa del char (sólido carbonoso) producido a partir de la lana, en comparación con el producido a partir del algodón y el poliéster, es la que menos se vio afectada con la temperatura. En cambio, el del algodón es el que más.

En la Figura 13 se representa la conversión del carbono a gas de síntesis a lo largo del tiempo durante la gasificación de la lana a diferentes temperaturas. Se observa que a una mayor temperatura, la conversión obtenida es mayor. Sin embargo, si comparamos estos resultados con las otras fibras (algodón y poliéster), se obtiene que la lana es la que menos char reacciona (menos pendiente en las curvas de la figura).

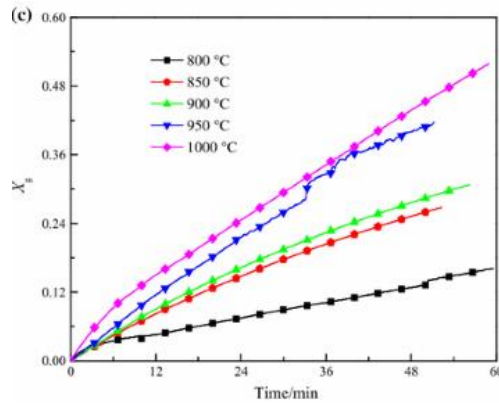


Figura 13- Conversión del carbono durante el tiempo en la gasificación de lana. [28]

2.4.3 Torrefacción de la fibra de lana

No se encuentran muchos estudios de la torrefacción de la fibra de lana, pero en el mismo artículo que se estudió la torrefacción de algodón, poliéster y viscosa [21], también se analizó para la mezcla de acrílico y lana (1:1).

Se llevó a cabo en las mismas condiciones descritas anteriormente.

Se obtuvo que esta mezcla presentaba un elevado rendimiento del producto sólido, pero que debido a su alto contenido de nitrógeno (debido al acrílico) (ver Figura 14), no eran adecuadas para utilizarlo como combustible.

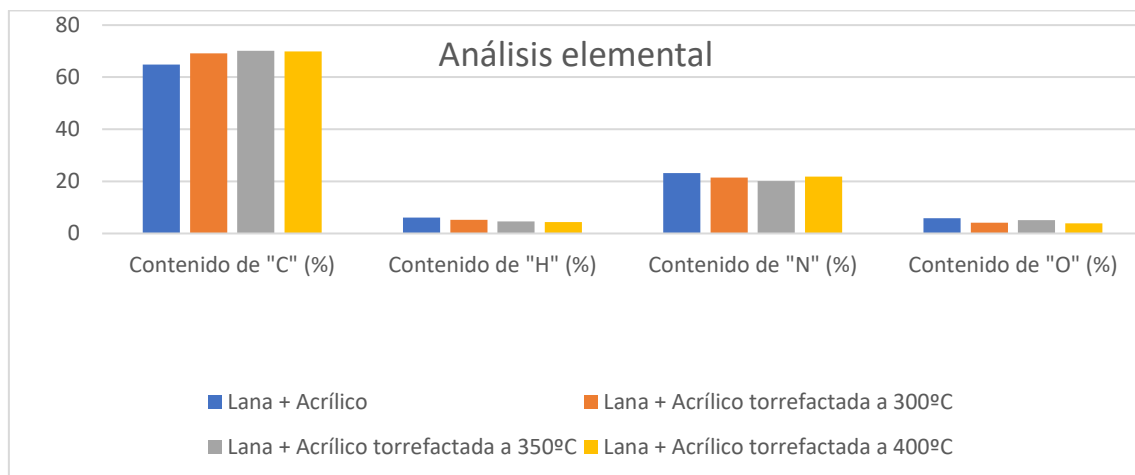


Figura 14- Análisis Elemental de la mezcla de lana y acrílico (1:1) antes y tras la torrefacción

2.5 Mezcla de textiles

2.5.1 Pirólisis de la mezcla de textiles

S. Yousef *et al.* (2019) [29] realizaron un estudio sobre la pirólisis de residuos textiles, concretamente de jeans de color azul y negro.

Se llevó a cabo en una planta de pirólisis en la cual se podía introducir 300g del material. Estos experimentos se realizaron a una velocidad de calentamiento de 2°C/min hasta una temperatura de 800°C. Además, se introducía a la vez una corriente de nitrógeno de un caudal de 5L/min y los metales pesados se utilizaron como autocatalizadores (lo que aceleró el proceso y aumentó el rendimiento del bioaceite generado).

Se obtuvieron productos bioaceite, biogas y char con muy buenas propiedades energéticas, con rendimientos del 37,5%, 44,7% y 17,8% respectivamente. Además, en el proceso se convirtió un 82,2% de los residuos.

Por otra parte, estos residuos contienen una alta cantidad de carbono e hidrógeno y poca cantidad de nitrógeno y azufre, aumentando un 15% la cantidad de carbono (ver Figura 15).

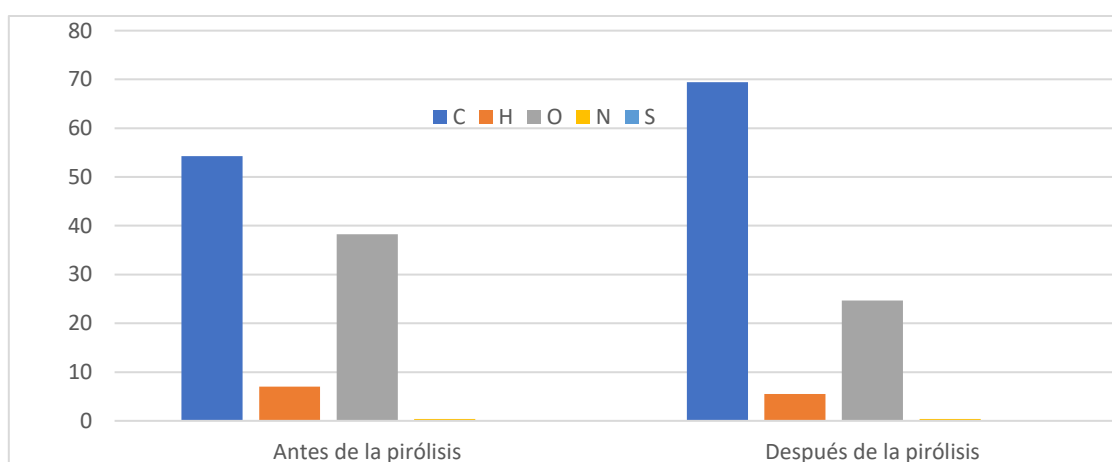


Figura 15- Análisis elemental antes y después de la pirólisis [29]

2.5.2 Gasificación de la mezcla de textiles

En el mismo artículo en el que se analizó la gasificación de la fibra de poliéster (2.2.3) [23], se trabajó también con el algodón y la mezcla de estos dos.

Por lo tanto, podemos relacionar el análisis de la gasificación de la mezcla de algodón y poliéster de este estudio a lo que ocurriría en una gasificación de residuos textiles genéricos, ya que la mayor parte de estos estarán formados por algodón y poliéster.

Se realizaron en las mismas condiciones descritas anteriormente: se calentó a diferentes temperaturas: 650, 750 y 850°C y se utilizó un reactor de lecho burbujeante.

Al igual que para el poliéster, para la mezcla se obtuvieron gas permanente (gas de síntesis) y compuestos aromáticos.

- **Gas permanente:**

En la Tabla 10 se presentan los rendimientos en porcentaje de volumen que se obtuvieron de los gases permanentes tras la gasificación de la mezcla de poliéster y algodón.

Tabla 10- Rendimientos en %vol de los gases permanentes para la gasificación de la mezcla

	CO ₂ (%vol)	CO (%vol)	H ₂ (%vol)	CH ₄ (%vol)
650°C	54,2	30,7	10	5,2
750°C	49,7	27,2	14,8	8,2
850°C	35,8	30,3	23,2	10,7

- **Compuestos aromáticos:**

En la Tabla 11 se presentan las composiciones de los compuestos aromáticos que se produjeron tras la gasificación de la mezcla de poliéster y algodón a diferentes temperaturas.

Tabla 11- Composición en g/kg en base seca de los compuestos aromáticos en la gasificación de poliéster

	Benceno (g/kg)	Tolueno, o/p-xileno, estireno, metilestireno (1 anillo) (g/kg)	Naftalina (g/kg)	Compuestos de 2 anillos (g/kg)	Compuestos de más de 3 anillos (g/kg)	Fenoles (g/kg)
650°C	5	20	1,5	15	3	4,75
750°C	23	21	5	15	4,5	1,5
850°C	32	14	6	10,5	5	0

Se obtuvo un rendimiento total del gas permanente menor, en comparación al poliéster y algodón puros, en torno a 0,5-0,7 kg/kg y de compuestos aromáticos se obtuvo alrededor de 0,1 kg/kg. No obstante, esta mezcla, se consideró una buena candidata para la obtención de gas de síntesis y compuestos aromáticos.

2.5.3 Torrefacción de la mezcla de textiles

En un trabajo realizado por *Y. P. Rago et al. (2018)* [8], se estudió la torrefacción de desechos textiles para la obtención de combustible.

Este estudio se realizó a diferentes temperaturas: 225, 250, 275 y 300°C/min durante 1h y 3h a una velocidad de calentamiento de 15°C/min.

La cantidad de carbono producido en la torrefacción aumentó al aumentar la temperatura, y por lo tanto también aumentó el contenido energético. En cambio, la cantidad de hidrógeno y de oxígeno presente disminuyó y la cantidad de nitrógeno se mantuvo muy baja (ver Figura 16).

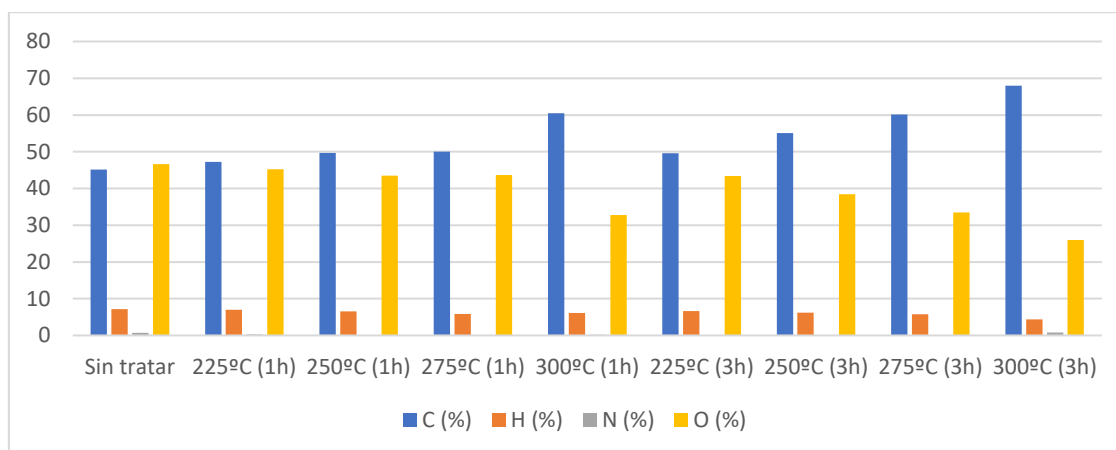


Figura 16- Análisis elemental de los residuos textiles antes y después de la torrefacción.

Se obtuvo un combustible con unas características muy similares a las del carbón e incluso menos dañino. Por lo tanto, la torrefacción de los residuos textiles es un proceso muy eficaz y cuyo producto puede incluso ser un sustituto para las aplicaciones del carbón.

Actualmente podemos encontrar empresas que se dedican a la torrefacción. Por ejemplo, una empresa Europea llamada Torrcoal [30], propone como solución sostenible el proceso de torrefacción ante el problema actual de la acumulación de residuos. En este se tratan diversas materias para transformarlas en biochar, el cual tiene aplicaciones para instalaciones industriales y procesos petroquímicos.

Las materias torrefactadas pueden ser reciclables o desechos no reciclables. Dentro de los no reciclables, encontramos los textiles, los cuales están mezclados con otros desechos como el plástico, el caucho, la madera o el papel. Para este caso, se llevó a cabo la torrefacción a temperaturas de 340°C y 360°C. Los resultados obtenidos para las dos temperaturas se pueden observar en la Tabla 12.

Tabla 12- Resultados de la Torrefacción de desechos no reciclables (Torrcoal) [30]

		30% / 70%	50% / 50%
		340°C	360°C
Moisture	% (a.r.)	0,10	0,10
Ash	% (d.b.)	4,70	13,10
Volatiles	% (daf)	38,00	60,90
GCV (daf)	MJ/kg	31,60	34,40
NCV (a.r.)	MJ/kg	29,10	28,50
Hydrogen	% (daf)	5,10	7,60
Carbon	% (daf)	79,70	78,30
Nitrogen	% (daf)	0,74	0,88
Sulfur	% (daf)	0,18	0,31
Oxygen	% (daf)	14,30	12,80
Ca	g/kg (a.r.)	12,50	28,70
Na	g/kg (a.r.)	0,50	1,70
K	g/kg (a.r.)	3,90	2,50
Mg	g/kg (a.r.)	1,00	1,60
Fe	g/kg (a.r.)	0,70	8,10
Si	g/kg (a.r.)	7,00	21,50
Cd	mg/kg (a.r.)	1,60	2,60
Pb	mg/kg (a.r.)	40,10	398,80
Hg	mg/kg (a.r.)	< 0,02	< 0,02
P	mg/kg (a.r.)	815,00	811,00

2.5.4 Carbonización hidrotérmal de la mezcla de textiles

Y. Lin et al. (2016) [31] estudiaron la carbonización hidrotérmal de los residuos textiles.

Este experimento se realizó a dos temperaturas: 230°C y 280°C y con dos tiempos de residencia: 30 y 90 minutos.

Tras la carbonización hidrotérmal se obtuvieron principalmente hidrocarburo (el cual contenía el carbono fijo), una fracción soluble (que contenía el 98% de la materia volátil) y gas (ver Figura 17).

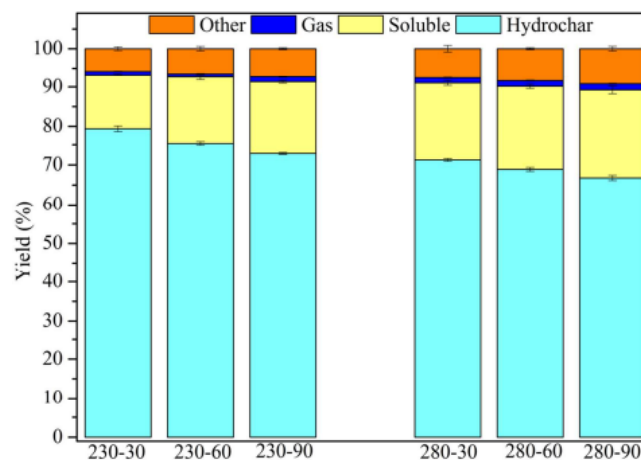


Figura 17- Productos obtenidos tras la carbonización de los residuos textiles en diferentes condiciones. [31]

2.6 Resumen

En los procesos termoquímicos estudiados para cada fibra se presentan diversos comportamientos para cada caso, presentando diferentes temperaturas de descomposición y compuestos formados.

Para el caso de la fibra de algodón presentó muy buenos resultados en todos los procesos termoquímicos estudiados en este trabajo, ya que se obtuvieron productos con un alto contenido de energía.

La fibra de poliéster obtuvo productos con altas propiedades energéticas en todos los procesos termoquímicos excepto en la torrefacción debido a su alta estabilidad térmica.

Para la fibra de viscosa en general, se descompuso a temperaturas inferiores. Tras estos procesos, se aumentó el contenido de carbono, aunque no tanto como las anteriores fibras.

En los procesos termoquímicos para la fibra de lana, a pesar de que se obtuviera un producto con menor valor energético que en comparación con los primeros, se consideró buena candidata para obtener combustible. Sin embargo, la torrefacción no fue adecuada debido a su alto contenido de nitrógeno.

La mezcla de textiles obtuvo productos con alto contenido de carbono tras todos los procesos termoquímicos estudiados.

3 Simulación de una gasificación de textiles

3.1 Programa de simulación

Con el objetivo de simular el comportamiento de la gasificación de diferentes fibras y mezclas de estas, se ha desarrollado una simulación.

La simulación se ha realizado con el programa EES, utilizando las ecuaciones propias para el proceso de gasificación y con las composiciones de las fibras estudiadas a lo largo de este trabajo (Ver Anexo I).

Para que la aplicación funcione hay que introducir los valores de las variables de operación: la temperatura del aire a la entrada, el rendimiento del carbono, la eficiencia térmica del gasificador, el porcentaje del aire estequiométrico y el porcentaje del oxígeno en el aire. Además, también es necesario introducir el porcentaje de cada fibra para la mezcla con la que se quiera trabajar. Las posibles fibras con las que se puede trabajar en la aplicación son: algodón, poliéster, viscosa y lana (es decir las fibras estudiadas durante este trabajo).

A partir de estos valores, la aplicación puede calcular datos relevantes como la temperatura de gasificación (a partir del balance de energía), las composiciones de los gases a la salida (tan solo los gases permanentes, no compuestos aromáticos), el caudal de gas a la salida, el PCI del gas a la salida, la potencia teórica, el aire de combustión...

3.2 Procedimiento de cálculo

A partir de los porcentajes introducidos de cada fibra, la aplicación calcula la composición de la mezcla, su PCS, humedad y cenizas de la mezcla.

A partir de estos datos, el programa realiza el cálculo de la composición del residuo, en base húmeda, seca, en peso y porcentaje en peso y el total en peso.

Después, se calcula el **balance de materia**. Para ello:

- 1) Teniendo en cuenta las reacciones:



A partir de estas reacciones se calculan los caudales de O₂, N₂ y con estas el caudal de aire necesario para la combustión.

- 2) Después se calculan los átomos que contiene el gas de salida a partir del oxígeno introducido.

A continuación, se realiza el **balance de energía** para conocer la **temperatura de gasificación**. Para ello el programa parte del balance de materia y considera varias posibles temperaturas a las que tiene lugar la gasificación. Se calcula la diferencia de entalpías entre la salida y la entrada para diferentes temperaturas. La temperatura de gasificación corresponderá a la temperatura en la cual la diferencia de entalpías sea igual a cero. Para realizar el balance de energía se realiza:

- 1) El cálculo entalpía del residuo seco. Para ello, se calculan previamente los moles del residuo seco: CO₂, H₂O y SO₂. Estos se multiplican con sus respectivas entalpías de formación y se suman junto con el PCS de la mezcla, es decir:

$$\Delta H_{f, \text{residuo seco}} = \text{PCS} + \text{Moles CO}_2 * \Delta H_{f, \text{CO}_2} + \text{Moles H}_2\text{O} * \Delta H_{f, \text{H}_2\text{O}} + \text{Moles SO}_2 * \Delta H_{f, \text{SO}_2}$$

Ecuación 12

- 2) Cálculo de la energía a la entrada del gasificador, que se obtiene sumando las entalpías del residuo, del O₂ y del N₂ a la entrada (que se obtienen teniendo en cuenta la temperatura de entrada).

$$\Delta H_{\text{entrada}} = \Delta H_{\text{residuo}} + \Delta H_{\text{O}_2 \text{ entrada}} + \Delta H_{\text{N}_2 \text{ entrada}}$$

Ecuación 13

- 3) Cálculo de la energía a la salida del gasificador. Se obtiene sumando las entalpías de los gases producidos, es decir: H₂, N₂, CO, CO₂, H₂O (vapor), CH₄ y C₂H₆. Estas entalpías se han de calcular con las diferentes **temperaturas de gasificación supuestas**.

$$\Delta H_{\text{salida}} = \Delta H_{\text{cenizas}} + \Delta H_{\text{H}_2 \text{ salida}} + \Delta H_{\text{N}_2 \text{ salida}} + \Delta H_{\text{CO} \text{ salida}} + \Delta H_{\text{CO}_2 \text{ salida}} + \Delta H_{\text{CH}_4 \text{ salida}} + \Delta H_{\text{C}_2\text{H}_6 \text{ salida}} * \text{Efic. Termica Gasificador}$$

Ecuación 14

Para este balance se utiliza otro valor derivado de resultados experimentales, que es la eficiencia térmica, que se ha considerado igual a 0,9.

Finalmente se pueden calcular los resultados. Los más relevantes son:

- El caudal de gas a la salida, caudal volumétrico del gas seco a la salida y el flujo másico del gas a la salida.
- Composición de los gases a la salida (en %volumen y %volumen seco) (H₂, N₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄ y C₂H₆), calculados a partir de sus flujos de salida.
- El PCI del gas a la salida, que se calcula sumando los productos del PCI de cada gas por su composición.
- La potencia teórica, multiplicando el PCI del gas a la salida por el caudal seco a la salida.

3.3 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la simulación de la gasificación para diferentes textiles y mezclas a presión y temperatura de alimentación del aire atmosférica.

De forma general, y como se ha comentado, se ha introducido en la aplicación la composición y poder calorífico de cada material, utilizando diferentes porcentajes de aire respecto al estequiométricamente necesario para la combustión (entre 20 y 30 %), obteniéndose en cada caso la composición de los gases producidos, la temperatura del reactor y el caudal y el PCI del gas a la salida.

3.3.1 Gasificación del algodón

Para la simulación de la gasificación del algodón, se ha introducido en la aplicación la siguiente composición en masa en base seca: H = 4,02%, C = 48,96%, N = 0,81%, O = 45,33%, S = 0,88% y un poder calorífico superior en base seca de PCS =4115,31 kcal/kg. [28]

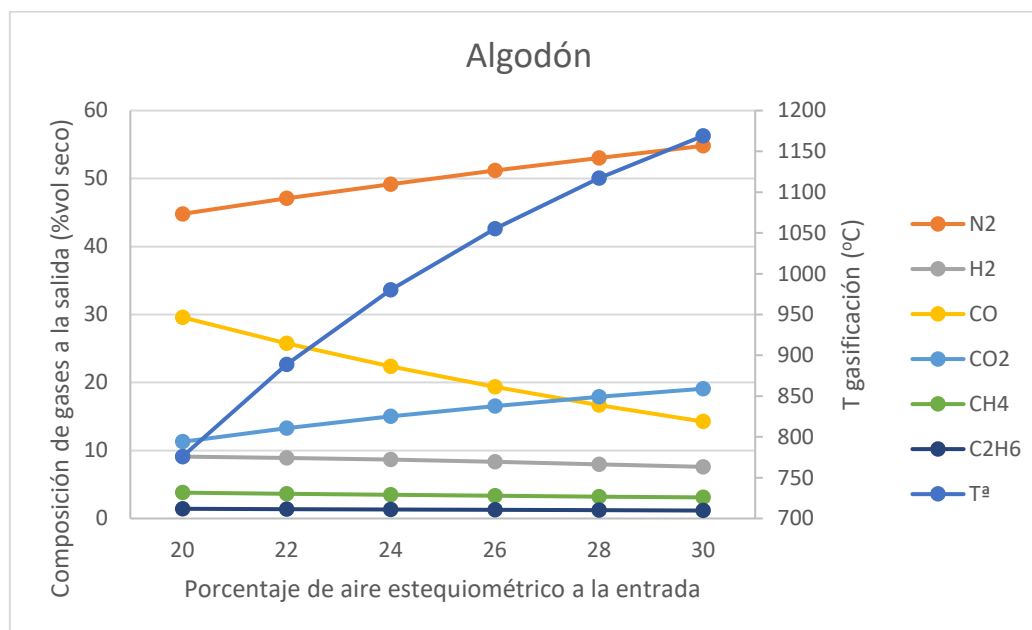


Figura 18- Gasificación del algodón: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico

La Figura 18 representa gráficamente la Tabla AII 1 (ver Anexo II). Puede verse como la temperatura se incrementa desde 775,8°C hasta 1169°C al incrementar la cantidad de aire adicionado, debido a la mayor cantidad de material que se oxida por la mayor disponibilidad de oxígeno.

El aumento del aire y de la temperatura produce un incremento en el nitrógeno y CO₂, como era esperable y una disminución del resto de las especies obtenidas.

La composición en porcentaje de volumen seco de CO disminuye desde 29,59% hasta 14,25% y el H₂ desde 9,10% hasta 7,60%.

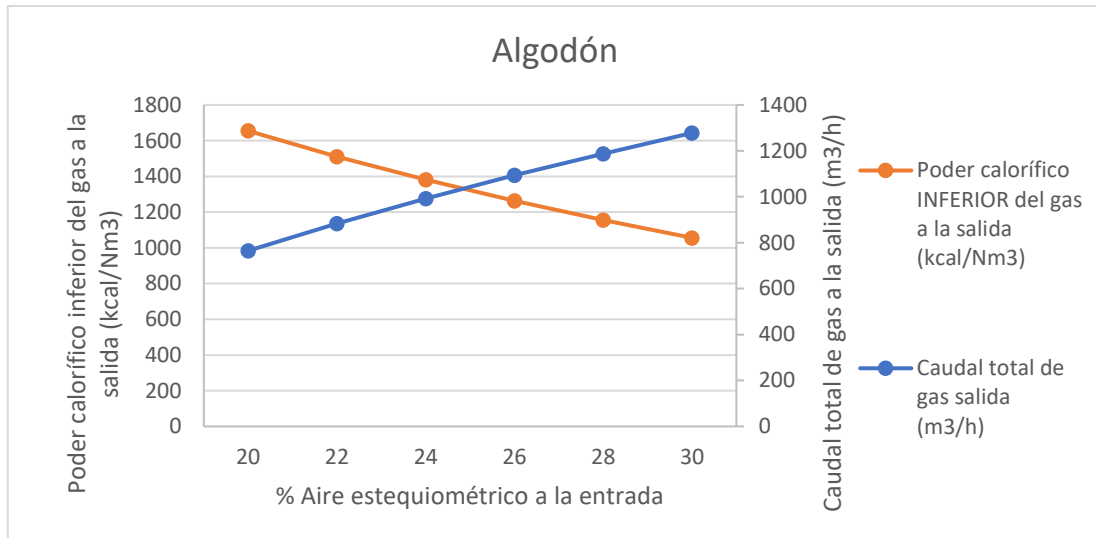


Figura 19- Gasificación del algodón: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico

La Figura 19 representa los datos de la Tabla AII 2. El caudal total del gas a la salida aumenta de 765,1m³/h a 1278 m³/h, y por el contrario el PCI del gas a la salida disminuye (de 1655kcal/Nm³ a 1056kcal/Nm³). Esto se debe a que, al introducir más aire, la cantidad de nitrógeno aumenta (como también se observa en la composición), lo que produce un aumento del caudal y una disminución del poder calorífico.

3.3.2 Gasificación del poliéster

Para la gasificación del poliéster, se ha simulado en la aplicación con una composición en masa en base seca de: H = 3,84%, C = 62,57%, N = 0,7%, O = 32,07%, S = 0,82% y un poder calorífico superior en base seca de PCS = 5518,64 kcal/kg. [28]

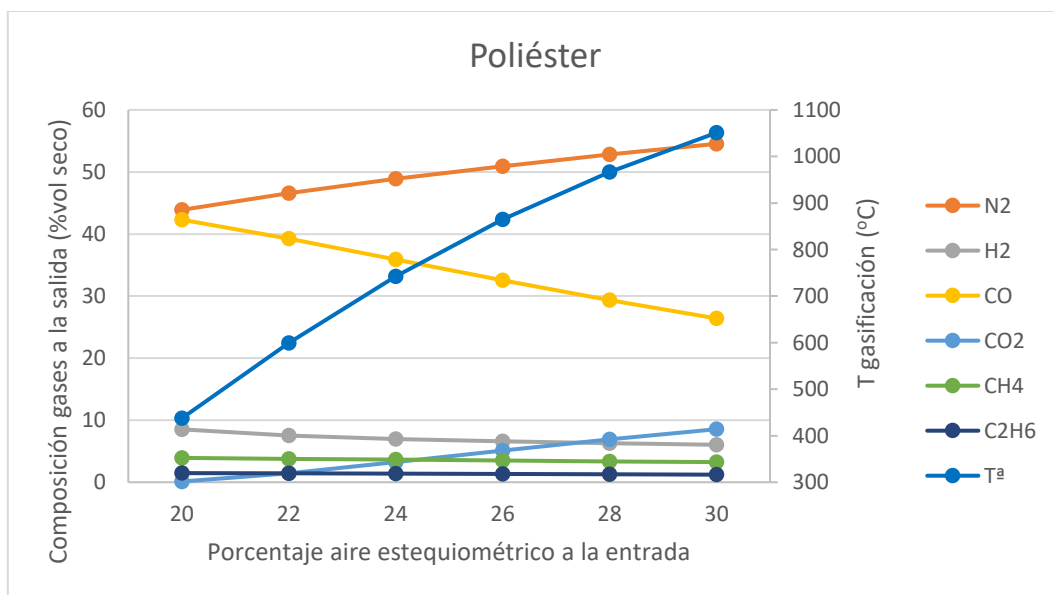


Figura 20- Gasificación del poliéster: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico

La Figura 20 representa los valores obtenidos de temperatura y composición de gases a la salida presentados en la Tabla AII 3 (ver Anexo). La temperatura en este caso toma valores más pequeños que en comparación con el algodón (desde 437,4°C hasta 1051°C).

La composición en porcentaje de volumen seco de CO disminuye desde 29,59% hasta 14,25% y el H₂ desde 9,10% hasta 7,60%.

La composición en porcentaje de volumen seco de CO disminuye desde 42,31% hasta 26,4% (valores más altos que en la gasificación del algodón) y el H₂ desde 8,52% hasta 6,04%.

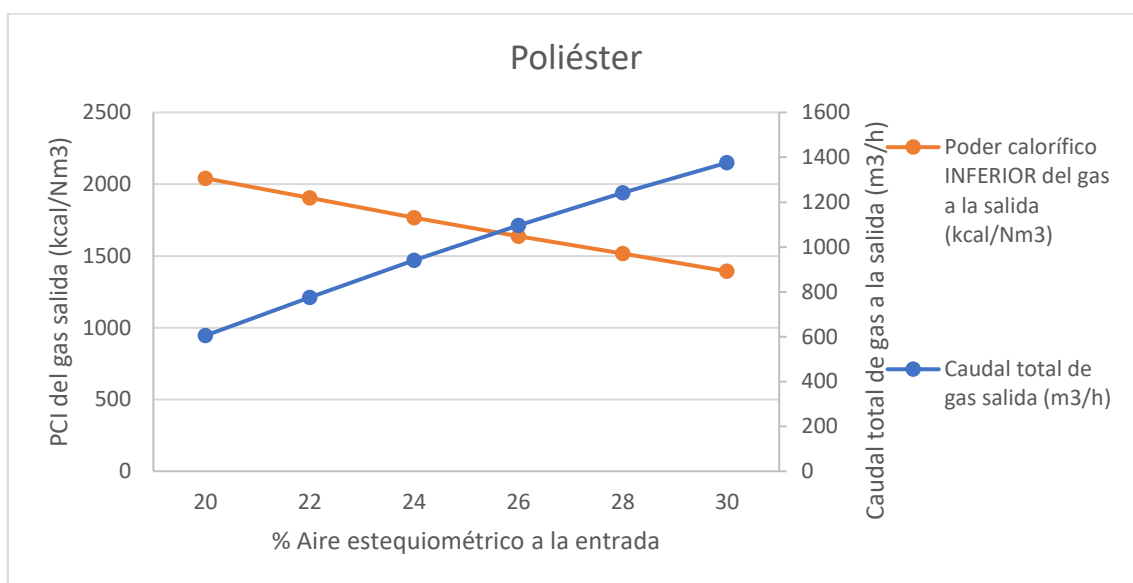


Figura 21- Gasificación del poliéster: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico

En la Figura 21 se representan gráficamente los datos de la Tabla AII 4. Se observa que el caudal total del gas a la salida aumenta de 605,1m³/h a 1376m³/h, y PCI del gas a la salida disminuye de 2041kcal/Nm³ a 1393kcal/Nm³.

3.3.3 Gasificación de vaqueros

Se ha simulado la gasificación de unos vaqueros, formados por una mezcla de 70% algodón y 30% poliéster.

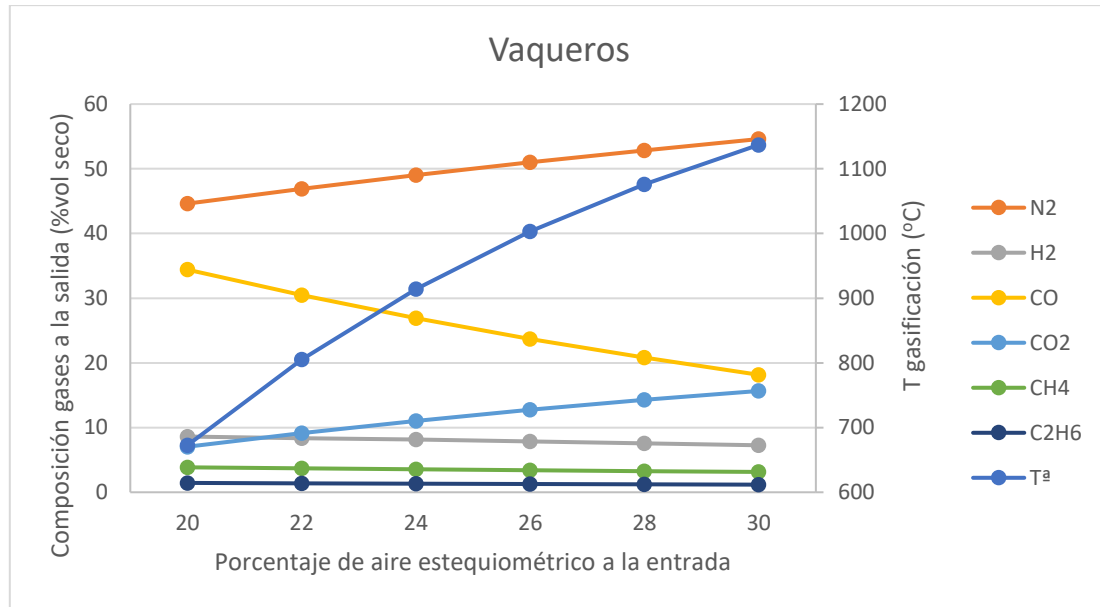


Figura 22- Gasificación de vaqueros: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico

La Figura 22 representa los valores de la Tabla AII 5, correspondiente a la gasificación de unos vaqueros. Los resultados obtenidos son esperados tras analizar las fibras individualmente y se presentan temperaturas desde los 672,7°C hasta 1137°C.

La composición en porcentaje de volumen seco de CO y H₂ también son esperados, disminuyendo desde 34,41% hasta 18,16% y desde 8,62% hasta 7,26% respectivamente

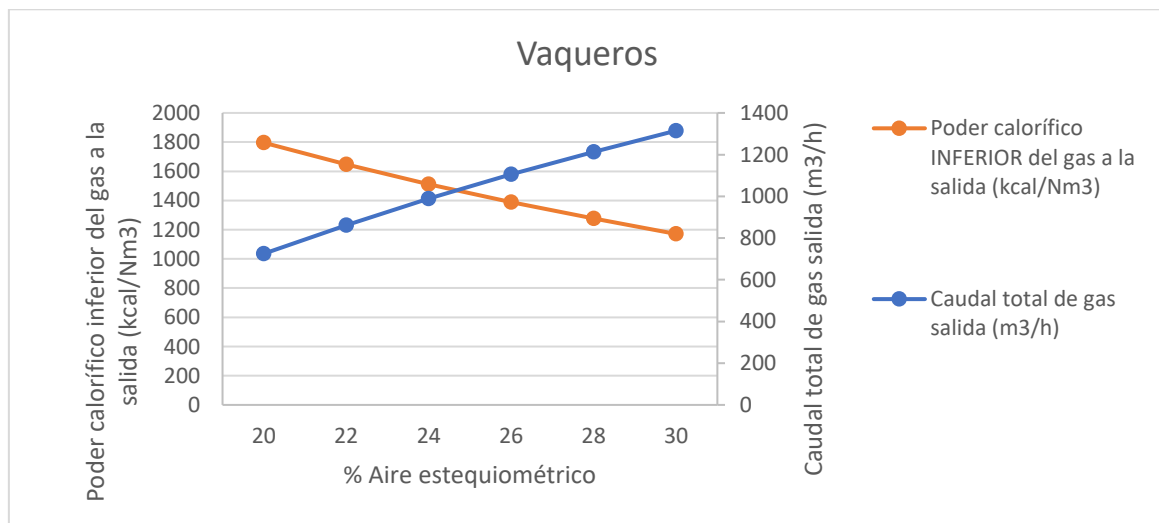


Figura 23- Gasificación de vaqueros: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico

En la Figura 23 se representan los datos correspondientes a la Tabla AII 6.

En el Anexo III se representan los resultados obtenidos para la simulación de la gasificación de la viscosa, lana y mezcla de textiles.

3.4 Comparación de los resultados

A continuación, compararemos y analizaremos los resultados obtenidos.

3.4.1 Temperatura de gasificación

En la Figura 24 se representa una comparación de las temperaturas de gasificación de los textiles estudiados. El algodón es la fibra que mayores temperaturas de gasificación presenta para los diferentes porcentajes de aire estequiométrico a la entrada. El poliéster y la lana presentan temperaturas de gasificación muy similares. En cambio, la viscosa es la fibra cuyas temperaturas de gasificación son menores.

Por otra parte, como cabe esperar, los pantalones, al presentar un alto contenido de algodón, también presentan temperaturas de gasificación muy altas, cercanas a las del algodón. También, son esperadas las temperaturas de la mezcla de fibras, después de haber analizado las fibras individualmente.

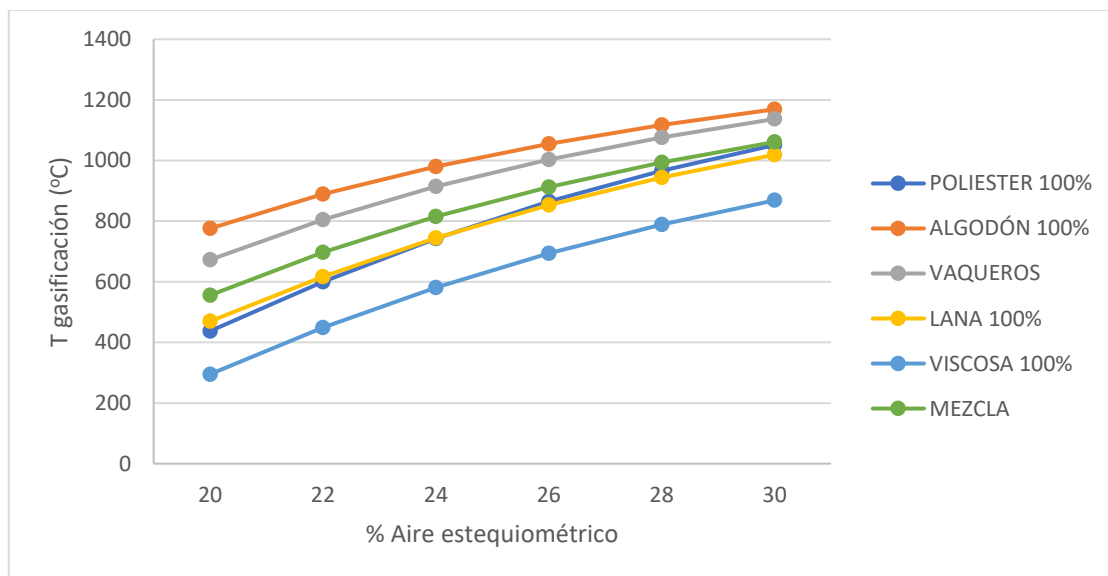


Figura 24- Comparación de temperaturas de gasificación para los textiles

3.4.2 Composiciones de gases a la salida

Por otra parte, compararemos las composiciones de cada gas (en porcentaje de volumen seco) obtenido para cada material:

- **H₂**: Para las composiciones obtenidas de H₂, ya se pueden observar más diferencias en los resultados. La lana es la que presenta mayor composición de H₂, a diferencia del poliéster, el cual es el que presenta menor composición.
Por otra parte, al aumentar el porcentaje de aire estequiométrico a la entrada, para todos los materiales analizados, se observa que su composición disminuye un poco.
- **CO**: A parte del nitrógeno, el CO es el gas del que mayores porcentajes se obtiene para los casos estudiados. También se observan diferentes valores de las composiciones de CO para las diferentes fibras. El poliéster es el que más porcentaje de este presenta con diferencia. Esto se debe a que el poliéster, en comparación con las otras fibras de la simulación, es la fibra que más porcentaje de carbono presenta. En cambio, la lana, el algodón y la viscosa presentan valores de CO más bajos.
Para la composición de CO, al aumentar el porcentaje de aire estequiométrico a la entrada, esta disminuye notablemente.
- **CO₂**: El algodón es la fibra que más porcentaje de CO₂ produce, seguido de la viscosa. En cambio, los que menos porcentaje de este presentan son la lana y el poliéster, siendo este último el que menos.
Al aumentar el porcentaje de aire estequiométrico a la entrada, debido al aumento de O₂, se produce más CO₂ en detrimento del CO.
- **CH₄**: Se obtienen pequeños porcentajes del gas CH₄ para los materiales estudiados, aunque no se observan notables diferencias para las composiciones de este entre las fibras. Además, también varían muy poco para los diferentes porcentajes de aire estequiométrico experimentados.
- **C₂H₆**: Se obtienen composiciones del gas C₂H₆ muy pequeñas y tampoco se observan grandes diferencias entre las fibras. Además, disminuyen ligeramente al aumentar el porcentaje de aire estequiométrico a la entrada.

3.4.3 Caudal de gas a la salida

Por último, analizaremos los caudales de gas obtenidos para los diferentes materiales. En la Figura 25 se observa que a bajos porcentajes de aire estequiométrico, el algodón es la fibra que más caudal de gas produce. En cambio, a mayores porcentajes de aire estequiométrico, el poliéster es la que mayor caudal presenta. La viscosa es la fibra que menos caudal de gas produce.

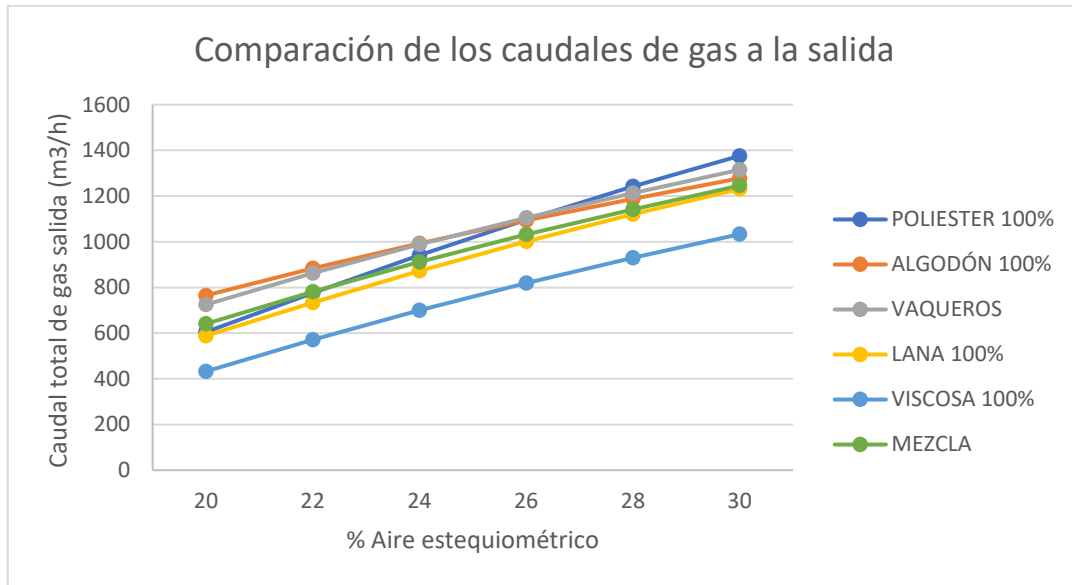


Figura 25- Comparación de los caudales de gas a la salida

4 Conclusiones

En este trabajo se han analizado los procesos termoquímicos para diferentes fibras textiles y mezclas de estos como posible solución al problema actual de la acumulación de residuos de este tipo. De estos estudios podemos concluir que, en la mayoría de ellos, estos procesos producen un combustible con buenas propiedades energéticas.

Los artículos localizados ponen en manifiesto que en la pirólisis de las fibras estudiadas se obtenían productos de valor añadido en todas ellas. Para el caso de la mezcla de textiles se obtuvieron bioaceite, biogas y carbón vegetal. Para el proceso de gasificación, se observó una alta conversión del carbono y se obtuvo como producto un gas de síntesis con alto contenido de energía. El proceso de torrefacción resultó que no era adecuado para la degradación de poliéster ni de la lana, al presentar alta estabilidad térmica. En cambio, para el algodón, viscosa y la mezcla de textiles resultó un proceso favorable para la obtención de un producto con alta cantidad de carbono y valor energético. En la carbonización hidrotermal resultó que el algodón y la mezcla de textiles producían alto contenido de hidrocarburos, más que para la viscosa.

Dentro de los procesos termoquímicos, la gasificación es uno de los más desarrollados hoy en día y más prometedores. En este contexto se ha desarrollado una aplicación en EES para hacer una primera estimación de la composición y caudal del gas de gasificación de textiles. Se han simulado los textiles estudiados y diferentes mezclas, obteniendo buenos resultados, con una elevada producción de CO. Se ha obtenido que el poliéster, en comparación con las demás fibras estudiadas y con unas composiciones y condiciones determinadas, es la que mejor se descomponía y producía un gas con mayor contenido energético.

5 Bibliografía

- [1] K. Shirvanimoghaddam, B. Motamed, S. Ramakrishna, and M. Naebe, "Death by waste: Fashion and textile circular economy case," *Sci. Total Environ.*, vol. 718, p. 137317, May 2020, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.137317.
- [2] D. Damayanti, L. A. Wulandari, A. Bagaskoro, A. Rianjanu, and H. S. Wu, "Possibility Routes for Textile Recycling Technology," *Polym. 2021, Vol. 13, Page 3834*, vol. 13, no. 21, p. 3834, Nov. 2021, doi: 10.3390/POLYM13213834.
- [3] "Información | Cityc." <http://cityc.es/informacion/> (accessed Mar. 21, 2022).
- [4] J. Moltó Berenguer, "Descomposición térmica de residuos textiles: estudio cinético y formación de contaminantes," pp. 252–266, 2007.
- [5] X. Chen, H. A. Memon, Y. Wang, I. Marriam, and M. Tebyetekerwa, "Circular Economy and Sustainability of the Clothing and Textile Industry," *Mater. Circ. Econ. 2021 31*, vol. 3, no. 1, pp. 1–9, Jul. 2021, doi: 10.1007/S42824-021-00026-2.
- [6] A. Peterson, "Towards Recycling of Textile Fibers," <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/218483/218483.pdf> , 2015.
- [7] "Datos y cifras | Naciones Unidas." <https://www.un.org/es/actnow/facts-and-figures> (accessed Mar. 21, 2022).
- [8] Y. P. Rago, D. Surroop, and R. Mohee, "Torrefaction of textile waste for production of energy-dense biochar using mass loss as a synthetic indicator," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 811–822, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.JECE.2017.12.055.
- [9] "Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible." <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/#> (accessed Mar. 22, 2022).
- [10] "Cuarto informe bienal de españa convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático", Ministerio para la transición ecológica del Gobierno de España.
- [11] H. Pirjo, "Research report", Accessed: Mar. 21, 2022. [Online]. Available: <https://cris.vtt.fi>
- [12] "Cantidad de residuos urbanos recogidos clasificados por tipo de residuo, periodo y comunidades autónomas." <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t26/e068/p01/serie/l0/&file=02003.px> (accessed Mar. 22, 2022).
- [13] "BOE.es - BOE-A-2022-5809 Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular." <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5809> (accessed Jun. 06, 2022).
- [14] "Sistemas de tratamiento." <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/> (accessed Mar. 22, 2022).
- [15] L. Arteaga Pérez, C. Segura, and K. Diéguez Santana, "Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica," *Afinidad Rev. química teórica y Apl.*, vol. 73, no. 573, pp. 60–68, 2016.
- [16] "La torrefacción: la última novedad en la bioenergía | News | CORDIS | European

Commission.” <https://cordis.europa.eu/article/id/36589-torrefaction-the-bioenergy-newcomer/es> (accessed Mar. 22, 2022).

- [17] R. Qi, Z. Xu, Y. Zhou, D. Zhang, Z. Sun, W. Chen and M. Xiong, “Clean solid fuel produced from cotton textiles waste through hydrothermal carbonization with FeCl₃: Upgrading the fuel quality and combustion characteristics,” *Energy*, vol. 214, p. 118926, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.118926.
- [18] Z. Xu, R. Qi, M. Xiong, D. Zhang, H. Gu, and W. Chen, “Conversion of cotton textile waste to clean solid fuel via surfactant-assisted hydrothermal carbonization: Mechanisms and combustion behaviors,” *Bioresour. Technol.*, vol. 321, p. 124450, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2020.124450.
- [19] P. Zhu, S. Sui, B. Wang, K. Sun, and G. Sun, “A study of pyrolysis and pyrolysis products of flame-retardant cotton fabrics by DSC, TGA, and PY–GC–MS,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 71, no. 2, pp. 645–655, Jun. 2004, doi: 10.1016/J.JAAP.2003.09.005.
- [20] A. Batuer, D. Chen, Q. Xin, X. He, J. Zhang, and Z. Huang, “Mechanical properties of waste cotton and their changes during early pyrolysis,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 149, p. 104855, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.JAAP.2020.104855.
- [21] A. Hanoğlu, A. Çay, and J. Yanik, “Production of biochars from textile fibres through torrefaction and their characterisation,” *Energy*, vol. 166, pp. 664–673, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.ENERGY.2018.10.123.
- [22] W. Qin, S. Chen, B. Ma, J. Wang, J. Li, R. Liang, Z. Xu, L. Liu, C. Dong and H. Zhang, “Methanol solution promoting cotton fiber chemical looping gasification for high H₂/CO ratio syngas,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 14, pp. 7149–7157, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2019.01.267.
- [23] I. Cañete Vela, J. Maric, and M. Seemann, “Valorisation of textile waste via steam gasification in a fluidized bed reactor”.
- [24] J. Rittfors, “Thermochemical textile recycling Investigation of pyrolysis and gasification of cotton and polyester Master’s thesis in Innovative and Sustainable Chemical Engineering”.
- [25] Y. F. Zhang, J. M. Dai, H. Guo, S. Shi, Z. F. Yan, and W. S. Hou, “A comparative study of carbon microsphere preparation by the hydrothermal carbonization of waste cotton fibers, viscose fibers and Avicel,” *New Carbon Mater.*, vol. 35, no. 3, pp. 286–294, Jun. 2020, doi: 10.1016/S1872-5805(20)60490-5.
- [26] H. Peng, P. Li, and Q. Yang, “Investigation on the reaction kinetics, thermodynamics and synergistic effects in co-pyrolysis of polyester and viscose fibers,” *React. Kinet. Mech. Catal.*, pp. 1–25, Jan. 2022, doi: 10.1007/S11144-022-02167-0/TABLES/4.
- [27] X. Sun, Z. Zhu, F. Zaman, Y. Huang, and Y. Guan, “Detection and kinetic simulation of animal hair/wool wastes pyrolysis toward high-efficiency and sustainable management,” *Waste Manag.*, vol. 131, pp. 305–312, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.WASMAN.2021.06.018.
- [28] C. Wen, Y. Wu, X. Chen, G. Jiang, and D. Liu, “The pyrolysis and gasification performances of waste textile under carbon dioxide atmosphere,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 128, no. 1, pp. 581–591, Apr. 2017, doi: 10.1007/S10973-016-5887-7/FIGURES/9.
- [29] S. Yousef, J. Eimontas, N. Strugas, M. Tatariants, M. Ali, S. Tuckete and L. Kliucininkas ,

“A sustainable bioenergy conversion strategy for textile waste with self-catalysts using mini-pyrolysis plant,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 196, pp. 688–704, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.06.050.

- [30] “About us - TorrCoal.” <https://www.torrcoal.com/about-torrcoal/> (accessed May 13, 2022).
- [31] Y. Lin, X. Ma, X. Peng, and Z. Yu, “A Mechanism Study on Hydrothermal Carbonization of Waste Textile,” *Energy and Fuels*, vol. 30, no. 9, pp. 7746–7754, Sep. 2016, doi: 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.6B01365/SUPPL_FILE/EF6B01365_SI_001.PDF.

Índice de Anexos

Índice de Tablas AII:

Tabla AII 1- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación del algodón	56
Tabla AII 2- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación del algodón.....	56
Tabla AII 3- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación del poliéster	56
Tabla AII 4- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación del algodón.....	57
Tabla AII 5- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de unos vaqueros.....	57
Tabla AII 6- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de unos vaqueros.....	57
Tabla AII 7- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de la viscosa	58
Tabla AII 8- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de la viscosa	58
Tabla AII 9- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de la lana	58
Tabla AII 10- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de la lana	59
Tabla AII 11- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de una mezcla de textiles	59
Tabla AII 12- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de una mezcla de textiles.....	59

Índice de Tablas AIII:

Figura AIII 1-Gasificación de la viscosa: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico.....	60
Figura AIII 2- Gasificación de la viscosa: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico	60
Figura AIII 3- Gasificación de la lana: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico.....	61
Figura AIII 4- Gasificación de la lana: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico	61
Figura AIII 5- Gasificación de mezcla: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico.....	62
Figura AIII 6- Gasificación de mezcla de textiles: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico	62

6 Anexos

6.1 Anexo I: Programa EES: Simulación de una gasificación

{SIMULACIÓN DE UN GASIFICADOR}

{Variables de operación} {Estas son las que podemos ir variando para obtener diferentes resultados}

T_entrada_aire=21 {°C}

Rend_C=1 {Rendimiento del C}

Efic_termica_gasificador=0,9

Porc_aire_esteq=25 {% Aire Estequiométrico}

Porc_O2_aire=21 {%O2 en el aire (enriquecimiento)}

{T_gasificador=} {HAY QUE AÑADIR ESTE DATO, explicación a continuación}

{HAY QUE OBTENER:T_gasificador {°C}-----> ITERAR: Tables, New parametric table: Tomamos T_gasificador y Delta Entalpia. Iteramos "T_gasificador" entre valores de 0 a 1500°C y le damos a "run" para calcular sus correspondientes "Delta Entalpia". Observamos los valores entre los que se encuentra el valor 0 de la Delta Entalpia y volvemos a iterar entre esos dos valores de temperatura, y volvemos a buscar donde más se acerque al 0, Así hasta que haya un error de >< 10 aproximadamente}

{Cuando ya hayamos obtenido T_gasificador, hay que añadir ese dato en el EES para que pueda calcular todo lo demás}

{Porcentajes de cada fibra que contiene la mezcla}

Porc_algodon=0

Porc_poliester=1

Porc_viscosa=0

Porc_lana=0

{Composición en masa en base seca de las fibras}

{ALGODÓN}

H_algodon=4,02

C_algodon=48,96

N_algodon=0,81

O_algodon=100-H_algodon-C_algodon-N_algodon-S_algodon

S_algodon=0,88

PCS_algodon=4115,31 {kcal/kg}

Cenizas_algodon=1,11

Humedad_algodon=0,59

{POLIESTER}

H_poliester=3,84

C_poliester=62,57

N_poliester=0,7

O_poliester=100-H_poliester-C_poliester-N_poliester-S_poliester

S_poliester=0,82

PCS_poliester=5518,6424{kcal/kg}

Cenizas_poliester=2,28

Humedad_poliester=2,17

{VISCOSA}

H_viscosa=6,2

C_viscosa=43,3

N_viscosa=0

O_viscosa=50,5

S_viscosa=0
PCS_viscosa=3912,3 {kcal/kg}
Cenizas_viscosa=1,15
Humedad_viscosa=9,69

{LANA}

H_lana=6
C_lana=44,2
N_lana=14,5
S_lana=3,4
O_lana= 100-H_lana-C_lana-N_lana-S_lana {calculado por diferencia}
PCS_lana=4657,5 {kcal/kg}
Cenizas_lana=1,51 {%}
Humedad_lana=1,88 {%}

{Base del trabajo}

Base=100 {kg/h} {Base del trabajo}
Humedad=Humedad_algodon*Porc_algodon+Humedad_poliester*Porc_poliester+Humedad_viscosa*Porc_viscosa+Humedad_lana*Porc_lana {%}
PCS=PCS_algodon*Porc_algodon+PCS_poliester*Porc_poliester+PCS_viscosa*Porc_viscosa+PCS_lana*Porc_lana {kcal/kg}

{Análisis elemental de la mezcla (% en peso)}

H=H_algodon*Porc_algodon+H_poliester*Porc_poliester+H_viscosa*Porc_viscosa+H_lana*Porc_lana
C=C_algodon*Porc_algodon+C_poliester*Porc_poliester+C_viscosa*Porc_viscosa+C_lana*Porc_lana
N=N_algodon*Porc_algodon+N_poliester*Porc_poliester+N_viscosa*Porc_viscosa+N_lana*Porc_lana
S=S_algodon*Porc_algodon+S_poliester*Porc_poliester+S_viscosa*Porc_viscosa+S_lana*Porc_lana
O=100-H-C-N-S

{Análisis inmediato referido a humedad variable (% en peso)}

M_Volatil=100-Cenizas-Humedad
Cenizas=Cenizas_algodon*Porc_algodon+Cenizas_poliester*Porc_poliester+Cenizas_viscosa*Porc_viscosa+Cenizas_lana*Porc_lana {%}

{-----}

{Cálculo de la composición del residuo}

H_B_Humeda=(100-Humedad)*H/100 {en base humeda (%wt)}
H_B_Seca=H_B_Humeda*100/(100-H2O_B_Humeda) {en base seca (%wt)}
H_Peso=H_B_Seca*10*Base*(1-Humedad/100) {g}
H_Porc_Peso=H_Peso/Total_Peso*100 {porcentaje en peso}

C_B_Humeda=(100-Humedad)*C/100 {en base humeda (%wt)}
C_B_Seca=C_B_Humeda*100/(100-H2O_B_Humeda) {en base seca (%wt)}
C_Peso=C_B_Seca*10*Base*(1-Humedad/100) {g}
C_Porc_Peso=C_Peso/Total_Peso*100 {porcentaje en peso}

N_B_Humeda=(100-Humedad)*N/100 {en base humeda (%wt)}
N_B_Seca=N_B_Humeda*100/(100-H2O_B_Humeda) {en base seca (%wt)}
N_Peso=N_B_Seca*10*Base*(1-Humedad/100) {g}
N_Porc_Peso=N_Peso/Total_Peso*100 {porcentaje en peso}

S_B_Humeda=(100-Humedad)*S/100 {en base humeda (%wt)}

$S_B_Seca = S_B_Humeda * 100 / (100 - H2O_B_Humeda)$ {en base seca (%wt)}
 $S_Peso = S_B_Seca * 10 * Base * (1 - Humedad / 100)$ {g}
 $S_Porc_Peso = S_Peso / Total_Peso * 100$ {porcentaje en peso}

$O_B_Humeda = 100 - H_B_Humeda - C_B_Humeda - N_B_Humeda - S_B_Humeda - Cenizas_B_Humeda - H2O_B_Humeda$ {en base humeda (%wt)}
 $O_B_Seca = O_B_Humeda * 100 / (100 - H2O_B_Humeda)$ {en base seca (%wt)}
 $O_Peso = O_B_Seca * 10 * Base * (1 - Humedad / 100)$ {g}
 $O_Porc_Peso = O_Peso / Total_Peso * 100$ {porcentaje en peso}

$Cenizas_B_Humeda = Cenizas$ {en base humeda (%wt)}
 $Cenizas_B_Seca = Cenizas_B_Humeda * 100 / (100 - H2O_B_Humeda)$ {en base seca (%wt)}
 $Cenizas_Peso = Cenizas_B_Seca * 10 * Base * (1 - Humedad / 100)$ {g}
 $Cenizas_Porc_Peso = Cenizas_Peso / Total_Peso * 100$ {porcentaje en peso}

$H2O_B_Humeda = Humedad$ {en base humeda (%wt)}
 $H2O_Peso = Humedad / 100 * Base * 1000$ {g}
 $H2O_Porc_Peso = H2O_Peso / Total_Peso * 100$ {porcentaje en peso}

$Total_B_Humeda = H_B_Humeda + C_B_Humeda + N_B_Humeda + S_B_Humeda + O_B_Humeda + Cenizas_B_Humeda + H2O_B_Humeda$ {en base humeda (%wt)}
 $Total_B_Seca = H_B_Seca + C_B_Seca + N_B_Seca + S_B_Seca + O_B_Seca + Cenizas_B_Seca$ {en base seca (%wt)}
 $Total_Peso = H_Peso + C_Peso + N_Peso + S_Peso + O_Peso + Cenizas_Peso + H2O_Peso$ {g}

{-----}

{Cálculo de los balances de Materia}

{Aire estequiométrico/real necesario:}

{C+O2 --> CO2} {Combustión de char}

$O2_1 = C_Peso / 12$ {mol/h}

$N2_1 = O2_1 * 79 / 21$ {mol/h}

$Aire_1 = O2_1 + N2_1$ {mol/h}

{2H+1/2O2 --> H2O} {Combustión de hidrógeno}

$O2_2 = H_Peso / 4$ {mol/h}

$N2_2 = O2_2 * 79 / 21$ {mol/h}

$Aire_2 = O2_2 + N2_2$ {mol/h}

{S+O2 --> SO2}

$O2_3 = S_Peso / 32$ {mol/h}

$N2_3 = O2_3 * 79 / 21$ {mol/h}

$Aire_3 = O2_3 + N2_3$ {mol/h}

{TOTAL}

$O2_Total = O2_1 + O2_2 + O2_3$ {mol/h}

$N2_Total = N2_1 + N2_2 + N2_3$ {mol/h}

$Aire_Total = Aire_1 + Aire_2 + Aire_3$ {mol/h}

$Caudal_Aire = (Porc_Aire_esteq * O2_Total / 100) * (1 + (100 -$

$Porc_O2_aire) / Porc_O2_aire) * 22,4 / 1000$ {Nm3/h}

$Flujo_masico_O2_enriq = ((Porc_Aire_esteq * O2_Total / 100) - N2_Moles * 21 / 79) * 32 / 1000$ {kg/h}

$Caudal_O2_enriq = Flujo_masico_O2_enriq / 1,4295$ {Nm3/h}

{Átomos que contiene el gas de salida}

$C_Atomos = C_Peso / 12$ {Átomos-g/h de C en gas}

$C_Atomos_rend = C_Atomos * Rend_C$

$C_Atomos_real = C_Atomos_rend - 0,08 * C_Atomos_rend - 0,03 * 2 * C_Atomos_rend$

$O_Atomos = ((Porc_Aire_esteq / 100) * 2 * O2_Total) + (O_Peso / 16) + (H2O_Peso / 18)$ {Átomos-g/h de O en gas}

$N2_Moles = O2_Total * Porc_Aire_esteq * (100 - Porc_O2_aire) / (Porc_O2_aire * 100)$ {Moles
 $N2/h\ en\ gas}$
 $H_Atomos = H_Peso + (H2O_Peso / 18) * 2$ {Atomos-g H/h
 $en\ gas}$
 $H_Atomos_real = H_Atomos - 0,08 * 4 * C_Atomos_rend - 4 * 0,03 * C_Atomos_rend$

{Cte de intercambio}

$Cte_intercambio = 10^{((0,00147 * (T_gasificador + 273)) - 1,629)}$

{Cálculo de los balances de Energía}{-----}

{Cálculo entalpía del residuos seco (base 1kg de residuos seco)}

$CO2_Moles = C_B_Seca * 10 / 12$

$H2O_liq_Moles = H_B_Seca * 10 / 2$

$SO2_Moles = S_B_Seca * 10 / 32$

$PCS_residuos_anhidro = PCS$

$Ahf_residuo_seco = PCS_residuos_anhidro + (CO2_moles * (-393,5 / 4,18)) + H2O_liq_Moles * (-285,84 / 4,18) + SO2_Moles * (-296,9 / 4,18)$

{Energía a la entrada del gasificador}

$Entalpia_residuo = (((Base * Ahf_residuo_seco * (1 - H2O_B_Humeda / 100)) + ((H2O_peso / 18) * (-285,84 / 4,18))))$ {kcal/h}

$Entalpia_O2_entrante_kJ = ((-731,0871) + (29,1 * T_entrada_aire) + (0,00579 * (T_entrada_aire^2)) - (0,0000020253 * (T_entrada_aire^3)) + (0,0000000032775 * (T_entrada_aire^4))) / 1000 * ((O2_Total * Porc_aire_esteq / 100))$

$Entalpia_N2_entrante_kJ = ((-725,6871) + (29 * T_entrada_aire) + (0,0010995 * (T_entrada_aire^2)) + (0,0000019076 * (T_entrada_aire^3)) - (0,0000000071775 * (T_entrada_aire^4))) / 1000 * N2_Moles$

$Entalpia_O2_entrante_kcal = Entalpia_O2_entrante_kJ / 4,18$

$Entalpia_N2_entrante_kcal = Entalpia_N2_entrante_kJ / 4,18$

$Entalpia_total_entrada = Entalpia_residuo + Entalpia_O2_entrante_kcal + Entalpia_N2_entrante_kcal$

{Energía a la salida del gasificador}

$Cp_cenizas = 0,25$ {kcal/kg}

$T_cenizas = T_gasificador$

$Entalpia_cenizas = (Cenizas_peso / 1000) * Cp_cenizas * (T_cenizas - T_ref)$ {kcal/h}

$T_ref = 25$ {°C}

$T_salida_gases = T_gasificador$

$Entalpia_H2_saliente = ((-721,04) + (28,84 * T_salida_gases) + (0,00003825 * (T_salida_gases^2)) - (0,0000012203 * (T_salida_gases^3)) + (0,00000000275 * (T_salida_gases^4))) / 1000 * H2_salida / 4,18$

$Entalpia_N2_saliente = ((-725,6871) + (29 * T_salida_gases) + (0,0010995 * (T_salida_gases^2)) + (0,0000019076 * (T_salida_gases^3)) - (0,0000000071775 * (T_salida_gases^4))) / 1000 * N2_Moles / 4,18$

$Entalpia_CO_saliente = (((-725,05203) + (28,95 * T_salida_gases) + (0,002055 * (T_salida_gases^2)) + (0,00000118266 * (T_salida_gases^3)) - (0,000000000555 * (T_salida_gases^4))) / 1000 * CO_salida / 4,18) + (CO_salida * (-110,52 / 4,18))$

$Entalpia_CO2_saliente = (((-915,8277) + (36,11 * T_salida_gases) + (0,021165 * (T_salida_gases^2)) - (0,000009623 * (T_salida_gases^3)) + (0,00000002008 * (T_salida_gases^4))) / 1000 * CO2_salida / 4,18) + (CO2_salida * (-393,5 / 4,18))$

$Entalpia_vapor_agua = ((-241,83 / 4,18) * H2O_salida) + ((H2O_salida) * (((-838,7) + (33,46 * T_salida_gases) + (0,00344 * (T_salida_gases^2)) + (0,000002534 * (T_salida_gases^3)) + (0,0000000089825 * (T_salida_gases^4)))) / 4180)$

$Entalpia_metano = (-17,889 + 13,5 / 1000 * (T_salida_gases - T_ref)) * CH4_salida$

$Entalpia_etileno = (12,496 + 13,5 / 1000 * (T_salida_gases - T_ref)) * C2H6_salida$

$Entalpia_total_salida = (Entalpia_cenizas + Entalpia_H2_saliente + Entalpia_N2_saliente + Entalpia_CO_saliente + Entalpia_CO2_saliente + Entalpia_vapor_agua + Entalpia_metano + Entalpia_etileno) * Efic_termica_gasificador$

{Diferencia de entalpías}

Delta_Entalpias=Entalpia_total_salida-Entalpia_total_entrada

{Tiene que salir: Delta_Entalpias=0}{-----}

{Cálculo de la composición y flujos de salida}

N2_salida=N2_Moles {mol/h}

H2_salida=H_Atomos_real/2-O_Atomos+C_Atomos_real+CO2_salida {mol/h}

H2_PCI=57,8 {kcal/mol}

H2_salida_PCI=H2_PCI*H2_Porc_vol_seco/100

CO_salida=C_Atomos_real-CO2_salida {mol/h}

CO_PCI=67,64 {kcal/mol}

CO_salida_PCI=CO_PCI*CO_Porc_vol_seco/100

H2O_salida=O_Atomos-C_Atomos_real-CO2_salida {mol/h}

CO2_salida=(((Cte_intercambio*O_Atomos)+(H_Atomos_real/2)-O_Atomos+C_Atomos_real)-(((Cte_intercambio*O_Atomos)+(H_Atomos_real/2)-O_Atomos+C_Atomos_real)^2-(4*(Cte_intercambio-1)*(Cte_intercambio*O_Atomos*C_Atomos_real-(Cte_intercambio*(C_Atomos_real^2))))))^0,5)/(2*(Cte_intercambio-1)) {mol/h}

CH4_salida=0,08*C_Atomos_rend {mol/h}

CH4_PCI=191,76 {kcal/mol}

CH4_salida_PCI=CH4_PCI*CH4_Porc_vol_seco/100

C2H6_salida=0,03*C_Atomos_rend {mol/h}

C2H6_PCI=316,2 {kcal/mol}

C2H6_salida_PCI=C2H6_PCI*C2H6_Porc_vol_seco/100

Total_salida=N2_salida+H2_salida+CO_salida+H2O_salida+CO2_salida+CH4_salida+C2H6_salida {mol/h}

Total_salida_PCI=H2_salida_PCI+CO_salida_PCI+CH4_salida_PCI+C2H6_salida_PCI {kcal/mol}

Balance_C=C_Atomos_rend-CO_salida-CO2_salida-CH4_salida-2*C2H6_salida {Balance de at-g C}

Balance_H=H_Atomos-H2_salida*2-H2O_salida*2-CH4_salida*4-C2H6_salida*4 {Balance de at-g H}

Balance_O=O_Atomos-CO_salida-CO2_salida*2-H2O_salida {Balance de at-g O}

{RESULTADOS}{-----}

{Entrada}

Flujo_masico_aire_entrada=Caudal_aire*1,293 {kg/h}

Caudal_aire_entrada_m3=Caudal_aire_entrada_Nm3*((T_entrada_aire+273)/273) {m3/h}

Caudal_aire_entrada_Nm3=Caudal_O2_enriq+Caudal_aire {Nm3/h}

{Salida}

Producción_cenizas=Cenizas_Peso/1000 {kg/h}

Caudal_gas_salida_m3=Total_salida*0,082*(T_gasificador+273)/1000 {m3/h}

Caudal_gas_salida_Nm3=Caudal_gas_salida_m3*(273/(T_gasificador+273)) {Nm3/h}

Caudal_gas_seco_salida=(Total_salida-H2O_salida)*0,082*273/1000 {Nm3/h}

Flujo_masico_gas_salida=Base-(Cenizas_Peso/1000)-(C_Atomos-C_Atomos_rend)*0,012+((N2_Total*Porc_Aire_esteq/100)*0,028)+((O2_Total*Porc_Aire_esteq/100)*0,032) {kg/h}

{Composición del gas de salida} {en %volumen y %volumen seco}

$N2_Porc_vol=N2_salida*100/Total_salida$
 $N2_Porc_vol_seco=N2_Porc_vol*100/(Total_Porc_vol-H2O_Porc_vol)$
 $H2_Porc_vol=H2_salida*100/Total_salida$
 $H2_Porc_vol_seco=H2_Porc_vol*100/(Total_Porc_vol-H2O_Porc_vol)$
 $CO_Porc_vol=CO_salida*100/Total_salida$
 $CO_Porc_vol_seco=CO_Porc_vol*100/(Total_Porc_vol-H2O_Porc_vol)$
 $H2O_Porc_vol=H2O_salida*100/Total_salida$
 $CO2_Porc_vol=CO2_salida*100/Total_salida$
 $CO2_Porc_vol_seco=CO2_Porc_vol*100/(Total_Porc_vol-H2O_Porc_vol)$
 $CH4_Porc_vol=CH4_salida*100/Total_salida$
 $CH4_Porc_vol_seco=CH4_Porc_vol*100/(Total_Porc_vol-H2O_Porc_vol)$
 $C2H6_Porc_vol=C2H6_salida*100/Total_salida$
 $C2H6_Porc_vol_seco=C2H6_Porc_vol*100/(Total_Porc_vol-H2O_Porc_vol)$

To-
 $tal_Porc_vol=N2_Porc_vol+H2_Porc_vol+CO_Porc_vol+H2O_Porc_vol+CO2_Porc_vol+CH4_Porc_vol+C2H6_Porc_vol$
 To-
 $tal_Porc_vol_seco=N2_Porc_vol_seco+H2_Porc_vol_seco+CO_Porc_vol_seco+CO2_Porc_vol_seco+CH4_Porc_vol_seco+C2H6_Porc_vol_seco$

$PCI_gas=Total_salida_PCI*1000/22,4$ {kcal/Nm3}
 $Potencia_teorica_100_porciento=PCI_gas*Caudal_gas_seco_salida/3600*4,18$ {Potencia teórica 100% (kWth)}
 $Aire_combustion=(2,39*CO_Porc_vol_seco+9,53*CH4_Porc_vol_seco+16,67*C2H6_Porc_vol_seco+2,39*H2_Porc_vol_seco)*Caudal_gas_seco_salida/100$ {Nm3/h}
 $Relacion_aire_gas=Aire_combustion/Caudal_gas_seco_salida$ {Relacion aire/gas (v/v)}
 $PCI_mezcla_kcal=PCI_gas/(1+Relacion_aire_gas)$ {kcal/Nm3}
 $PCI_mezcla_Btu=PCI_mezcla_kcal/37,259/0,239$ {Btu/ft3}
 $Eficacia_elect_teorica=33$ {%}
 $Capacidad_relativa=PCI_mezcla_Btu/86,19$
 $Potencia_teorica_alternador=Capacidad_relativa*Eficacia_elect_teorica*Potencia_teorica_100_porciento/100$ {Potencia teorica del alternador (kw)}
 $Potencia_nominal_motor_adop=6000$ {Potencia nominal del motor adoptada (kw)}
 $Porc_carga=Potencia_teorica_alternador*100/Potencia_nominal_motor_adop$ {Porcentaje de carga(%)}
 $Potencia_elect=Potencia_teorica_alternador*(-0,4716*(Porc_carga/100)^2+1,008*(Porc_carga/100)+0,4547)$ {Potencia electrica s/calculos (kw)}
 $Eficiencia_elect_neta=Potencia_elect*100/Potencia_teorica_100_porciento$ {%}

6.2 Anexo II: Tablas correspondientes a los resultados del programa EES para la gasificación de las diferentes fibras y materiales

Tabla AII 1- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación del algodón

ALGODÓN 100%							
% Aire estequiométrico	T gasificación (°C)	Composición de gases (% volumen seco)					
		N ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
20	775,8	44,8	9,10	29,59	11,28	3,80	1,43
22	888,7	47,07	8,91	25,76	13,27	3,63	1,36
24	980,3	49,18	8,65	22,38	15,01	3,48	1,31
26	1055	51,17	8,34	19,37	16,53	3,34	1,25
28	1117	53,04	7,98	16,68	17,88	3,22	1,21
30	1169	54,81	7,59	14,25	19,09	3,10	1,16

Tabla AII 2- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación del algodón

ALGODÓN 100%		
% Aire estequiométrico	Caudal total de gas salida (m ³ /h)	Poder calorífico INFERIOR del gas a la salida (kcal/Nm ³)
20	765,10	1655
22	883,90	1511
24	992,90	1381
26	1094,00	1263
28	1188,00	1155
30	1278,00	1056

Tabla AII 3- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación del poliéster

POLIESTER 100%							
% Aire estequiométrico	T gasificación (°C)	Composición de gases (% volumen seco)					
		N ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
20	437,4	43,89	8,52	42,31	0,12	3,93	1,47
22	599,4	46,57	7,52	39,26	1,44	3,79	1,42
24	742,5	48,88	6,96	35,89	3,27	3,64	1,37
26	864,6	50,93	6,59	32,54	5,12	3,50	1,31
28	966,7	52,80	6,30	29,37	6,89	3,37	1,26
30	1051	54,54	6,04	26,40	8,55	3,25	1,22

Tabla AII 4- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación del algodón

POLIESTER 100%		
% Aire estequiométrico	Caudal total de gas salida (m3/h)	Poder calorífico INFERIOR del gas a la salida (kcal/Nm3)
20	605,1	2041,07
22	775,8	1904,46
24	941	1767,86
26	1097	1637,95
28	1242	1516,52
30	1376	1393,30

Tabla AII 5- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de unos vaqueros

VAQUEROS (70% algodón, 30% poliéster)							
% Aire estequiométrico	T gasificación (°C)	Composición de gases (% volumen seco)					
		N ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
20	672,7	44,62	8,62	34,41	7,04	3,86	1,45
22	805,1	46,92	8,38	30,49	9,14	3,69	1,38
24	914	49,04	8,14	26,93	11,04	3,53	1,32
26	1003	51,01	7,87	23,71	12,74	3,39	1,27
28	1076	52,86	7,58	20,80	14,27	3,26	1,22
30	1137	54,60	7,26	18,16	15,66	3,15	1,18

Tabla AII 6- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de unos vaqueros

VAQUEROS		
% Aire estequiométrico	Caudal total de gas salida (m3/h)	Poder calorífico INFERIOR del gas a la salida (kcal/Nm3)
20	725	1796
22	862,3	1648
24	988,8	1512
26	1105	1389
28	1213	1276
30	1315	1171

Tabla AII 7- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de la viscosa

VISCOSA 100%							
% Aire estequiométrico	T gasificación (°C)	Composición de gases (% volumen seco)					
		N ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
20	295,1	46,32	11,91	28,34	8,69	3,45	1,29
22	448,9	48,36	11,98	23,89	11,27	3,27	1,23
24	581,3	50,24	12,01	19,92	13,55	3,11	1,17
26	693,7	52,02	11,89	16,50	15,50	2,98	1,12
28	788,4	53,76	11,61	13,60	17,11	2,86	1,07
30	868,6	55,48	11,17	11,14	18,43	2,75	1,03

Tabla AII 8- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de la viscosa

VISCOSA 100%		
% Aire estequiométrico	Caudal total de gas salida (m3/h)	Poder calorífico INFERIOR del gas a la salida (kcal/Nm3)
20	432,6	1640
22	570,5	1484
24	699,7	1343
26	819,5	1217
28	930,3	1106
30	1033	1006

Tabla AII 9- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de la lana

LANA 100%							
% Aire estequiométrico	T gasificación (°C)	Composición de gases (% volumen seco)					
		N ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
20	469,6	43,20	18,02	30,95	3,44	3,198	1,2
22	617,2	45,64	17,10	27,73	5,30	3,072	1,15
24	745	47,81	16,43	24,50	7,21	2,95	1,11
26	853,1	49,78	15,84	21,47	9,01	2,835	1,06
28	943,6	51,63	15,26	18,71	10,65	2,731	1,02
30	1019	53,39	14,66	16,22	12,10	2,635	0,99

Tabla AII 10- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de la lana

LANA 100%		
% Aire estequiométrico	Caudal total de gas salida (m3/h)	Poder calorífico INFERIOR del gas a la salida (kcal/Nm3)
20	588,4	1843
22	733,9	1704
24	871,9	1572
26	1001	1450
28	1120	1337
30	1231	1233

Tabla AII 11- Temperaturas de gasificación y composiciones de gases a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de una mezcla de textiles

MEZCLA							
(40% algodón, 20% poliéster, 20% lana, 20% viscosa)							
% Aire estequiométrico	T gasificación (°C)	Composición de gases (% volumen seco)					
		N ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
20	555,6	44,33	11,71	31,99	6,98	3,62	1,36
22	697,2	46,56	11,47	28,01	9,20	3,46	1,30
24	815,3	48,61	11,22	24,41	11,20	3,31	1,24
26	912,7	50,54	10,92	21,21	12,97	3,18	1,19
28	993,3	52,36	10,56	18,36	14,52	3,06	1,15
30	1061	54,10	10,15	15,82	15,88	2,95	1,11

Tabla AII 12- Caudal total y PCI del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico en la simulación de gasificación de una mezcla de textiles

MEZCLA		
(40% algodón, 20% poliéster, 20% lana, 20% viscosa)		
% Aire estequiométrico	Caudal total de gas salida (m3/h)	Poder calorífico INFERIOR del gas a la salida (kcal/Nm3)
20	640,9	1770
22	781,6	1621
24	911,8	1485
26	1032	1362
28	1142	1250
30	1246	1148

6.3 Anexo III:

6.3.1 Gasificación de la viscosa

Se simuló también en la aplicación la gasificación de la viscosa, con una composición en masa en base seca de: H = 6,2%, C = 43,3%, N = 0%, O = 50,5%, S = 0% [26] y un poder calorífico superior en base seca de PCS = 3912,3 kcal/kg [21].

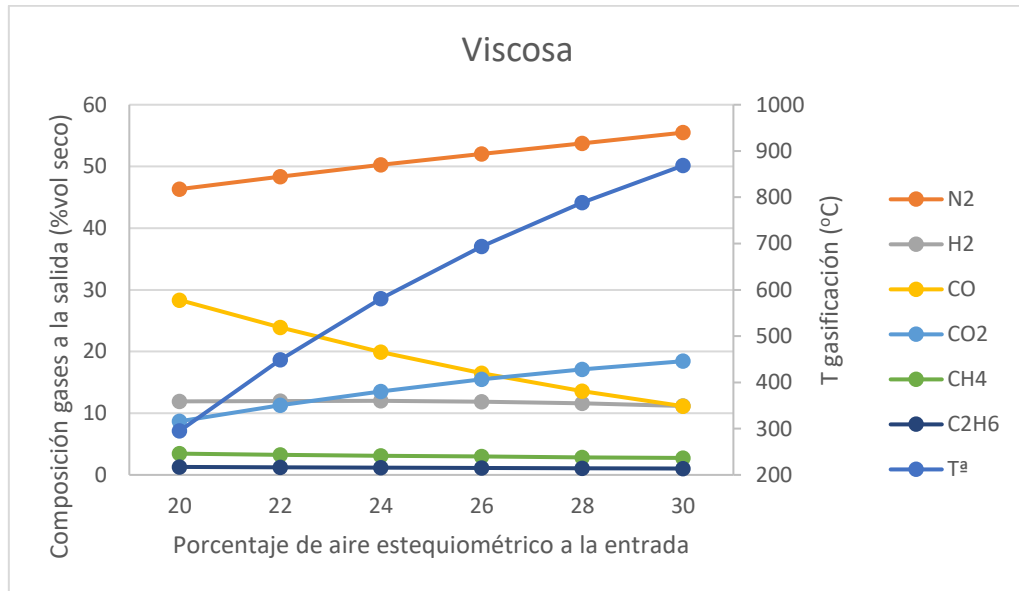


Figura AIII 1-Gasificación de la viscosa: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico

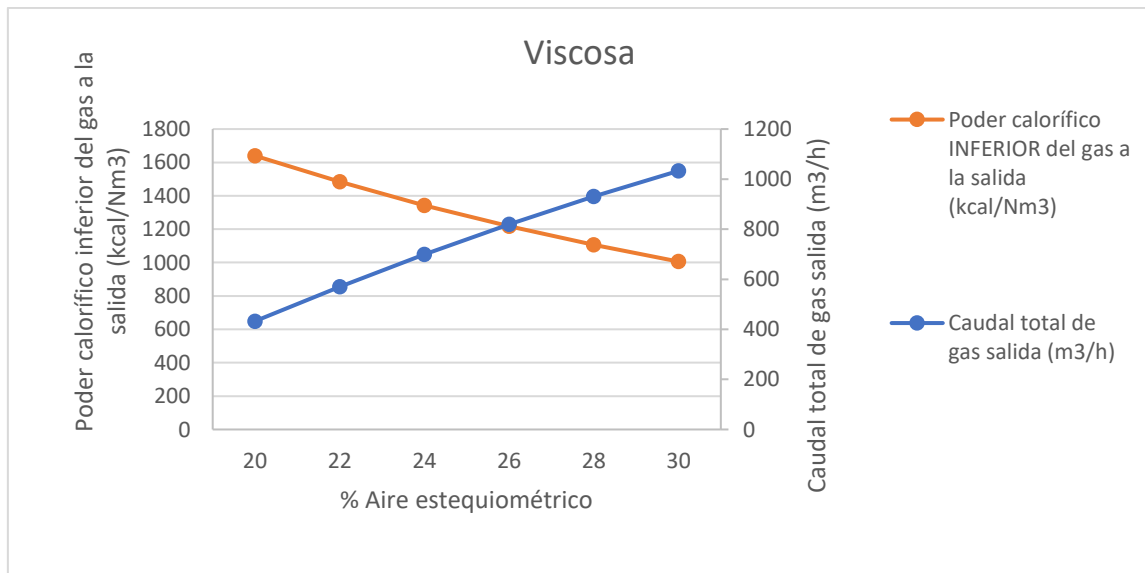


Figura AIII 2- Gasificación de la viscosa: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico

6.3.2 Gasificación de la lana

Para el caso de la lana, se simuló su gasificación con una composición en masa en base seca de: H = 6%, C = 44,2%, N = 14,5%, O = 31,9%, S = 3,4% y un poder calorífico superior en base seca de PCS = 4657,5 kcal/kg [27]

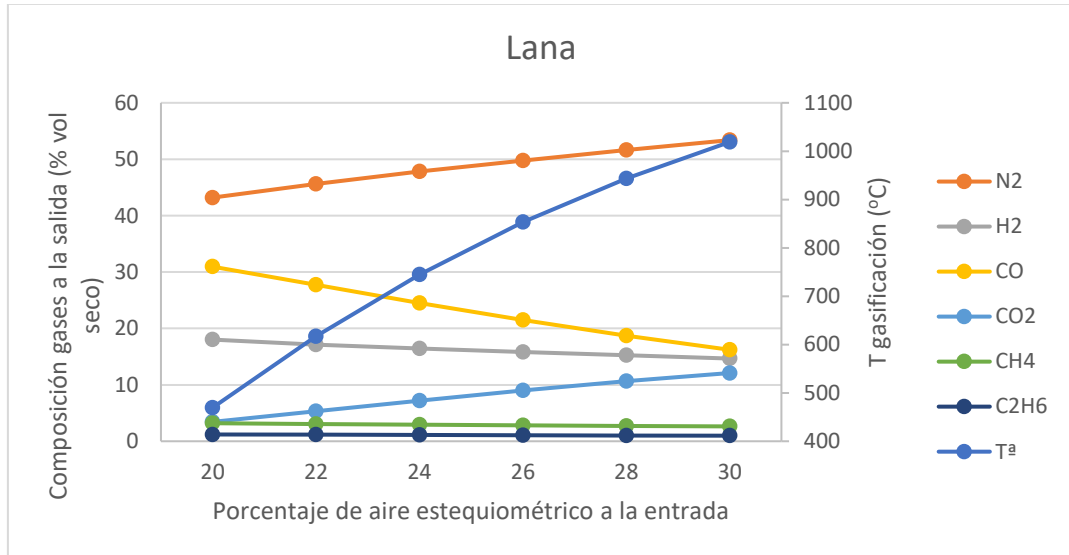


Figura AIII 3- Gasificación de la lana: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico

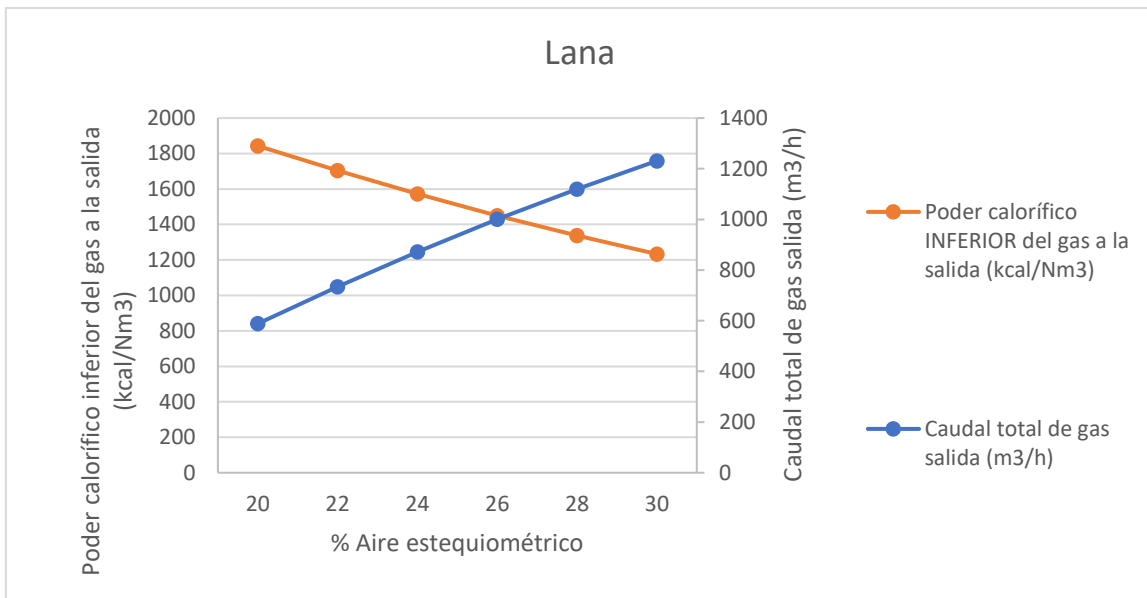


Figura AIII 4- Gasificación de la lana: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire

6.3.3 Gasificación de la mezcla de textiles

Finalmente, se simula la gasificación de una mezcla de textiles de 40% algodón, 20% poliéster, 20% lana, 20% viscosa.

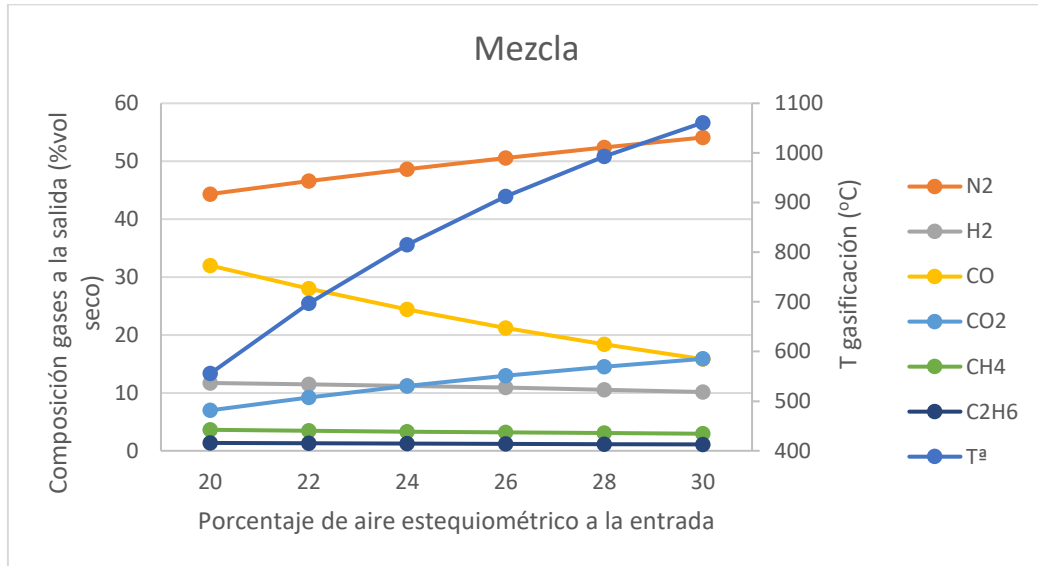


Figura AIII 5- Gasificación de mezcla: Composiciones de gases a la salida y temperaturas para diferentes porcentajes de aire estequiométrico

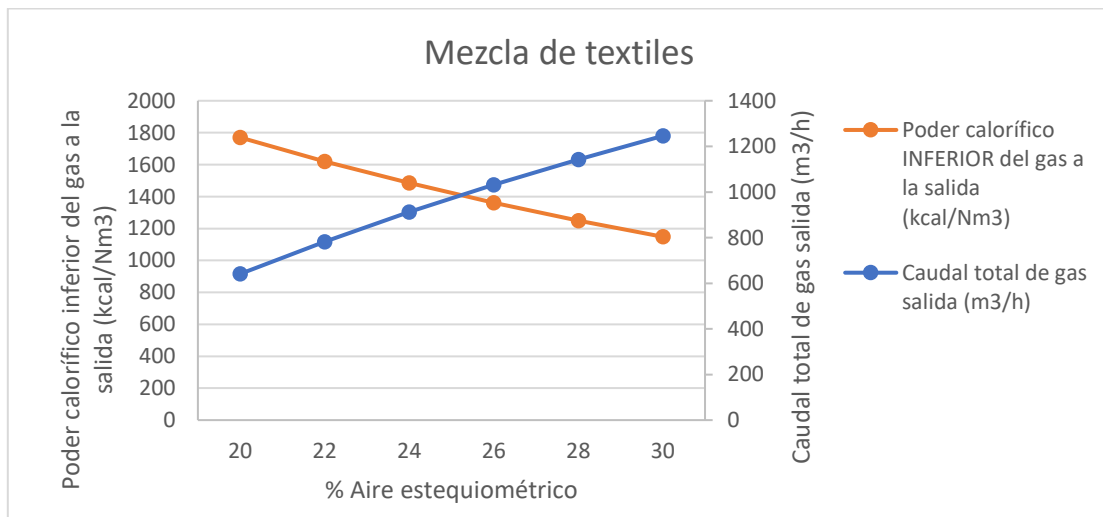


Figura AIII 6- Gasificación de mezcla de textiles: PCI y caudal del gas a la salida para diferentes porcentajes de aire estequiométrico