

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Evaluación del potencial energético de los residuos médicos desechables (PPNT)

como materia prima en un proceso de combustión

Andrés Felipe Luna Grisales

Juan Angel Moreno Jaimes

Trabajo de Grado para Optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

PhD. Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2022

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Agradecimientos

A mis padres, quienes siempre me inculcaron la importancia de la educación como medio para poder ser una buena persona para la sociedad, gracias por estar siempre pendientes de mi y educarme de la mejor manera posible, este mérito es para ustedes que siempre han luchado para brindarme lo mejor posible a lo largo de mi vida.

A mis hermanos, primos y tíos que estuvieron presentes a lo largo de este proceso y siempre me apoyaron de alguna u otra manera, gracias por siempre estar para mí y por haberme brindado sus consejos que sirvieron para forjar este logro que hoy consigo.

A mis amigos de la universidad, gracias por haber hecho de esta etapa de mi vida una época digna de recordar, gracias por compartir conmigo tantas noches de estudio y también de diversión, y sobre todo gracias por demostrarme el verdadero significado de la palabra amistad.

A mi novia Alejandra, quien estuvo conmigo en esta última etapa de mi carrera brindándome siempre su apoyo incondicional y compartiendo muchos momentos de felicidad, gracias por recordarme siempre lo importante de tener una buena compañía.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindarme todos los recursos necesarios para formarme como ingeniero UIS, gracias a todos los docentes que compartieron su conocimiento conmigo a lo largo de mi vida universitaria.

A mi compañero de tesis, quien estuvo conmigo haciendo un último esfuerzo para poder culminar con éxito este trabajo, pero sobre todo gracias por ser un buen amigo.

Gracias a la vida por permitirme disfrutarla día a día y recordarme siempre que puedo mejorar y alcanzar lo que me proponga.

Juan Angel Moreno Jaimes

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Agradecimientos

En primer lugar el agradecimiento de esta tesis va dirigido a mi familia, gracias por darme las capacidades y sobre todo los medios para poder llegar tan lejos, gracias a mi logro más grande en la vida que es mi madre por el esfuerzo y la confianza entregada durante todos estos años, por brindarme apoyo incondicional y creer en mí más que cualquiera, gracias por el cariño que me dio y por sus palabras sabias, por su orientación y por la esperanza que implanto en mí dándome la fuerza para nunca rendirme en perseguir mis metas y vivir mis sueños, gracias porque sin ella nada de esto sería posible.

Resaltar un sinigual gracias a mis dos hermanas Mayra y Viviana las cuales me rindieron como ejemplo a seguir y como veedoras de todo mi proceso evolutivo como profesional, gracias siempre por motivarme y reformarme, por cuidar mis pasos con interés propio y ser las mejores hermanas mayores que pude tener.

Gracias a mi padre por sentirse siempre orgulloso del hijo que tuvo.

Le agradezco profundamente a mi amigo Pacho por convertirse a través de los años en el pilar fundamental que siempre necesite y darme toda su gracia en forma de consejero, compañero y guía.

Gracias a la Universidad Industrial De Santander por permitirme crecer y evolucionar de muchas maneras, por darme un espacio lleno de lindos recuerdos y mentes brillantes que iluminaron mi ambición por ser más.

Gracias a mi novia Daniela por apoyarme durante la última etapa, pero no menos importante, por repetirme todos los días lo capaz que soy, por creer en mi visión y celebrar mis triunfos.

Un agradecimiento de igual parte a mi compañero de Tesis porque ambos fuimos consientes del esfuerzo detrás de esta investigación y por haber hecho del espacio de trabajo un lugar entre amigos.

Andrés Felipe Luna Grisales

Tabla de contenido

Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos:	14
2. Marco teórico e investigativo	15
2.1 Estudio de la contaminación en Colombia:	15
2.2 Plásticos en Colombia:	17
2.2.1. <i>Reaprovechamiento de los plásticos en la industria</i>	20
2.3 Combustión de los plásticos	22
2.3.1 <i>Tipos de combustión:</i>	26
2.3.2 <i>Etapas del proceso de combustión</i>	27
2.3.3 <i>Reacción química del proceso de combustión</i>	28
2.3.4 <i>Variables significativas en el proceso de Combustión</i>	28
2.4 El combustible	31
2.5 Emisiones contaminantes en el proceso de combustión:	33
2.5.1 <i>Nitrógeno (N₂):</i>	35
2.5.2 <i>Oxígeno (O₂):</i>	35
2.5.3 <i>Óxidos de nitrógeno (NO_x):</i>	35
2.5.4 <i>Oxido de azufre (SO_x):</i>	36
2.5.5 <i>Monóxido de carbono (CO):</i>	37
2.6 Reaprovechamiento de la energía:	37
2.6.1 <i>Potencial energético:</i>	38
2.6.2 <i>Aprovechamiento energético de los residuos por medio de tecnologías de combustión</i>	39
2.7 Materia objeto de investigación	46
2.7.1 <i>Estudio del polipropileno:</i>	47
2.7.2 <i>Polipropileno en forma de tela no tejida:</i>	49
2.8 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	52
2.8.1 <i>DSC por flux de calor:</i>	53
2.8.2 <i>DCS por compensación de energía:</i>	54

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

2.8.3 Factores que influyen en el DSC.....	56
3. Método y materiales	57
3.1 Preparación de la materia de investigación	57
3.1.1 Secado de las muestras	58
3.2 Prueba de volátiles y cenizas.....	62
3.3 Carbono fijo.....	63
3.4 Poder calorífico	63
3.5 Modelo teórico de temperatura de llama adiabática.....	64
3.6 Relación aire – combustible	67
3.7 Análisis de las emisiones por medio de la combustión de PPNT	70
3.8 Análisis termogravimétrico (TGA)	74
3.9 Potencial energético	75
4. Resultados y discusión	76
4.1 Secado de las muestras	77
4.2 Prueba de volátiles y cenizas.....	77
Nota. Esta tabla presenta los resultados de la prueba de cenizas los cuales fueron tomados 3 veces y su respectivo promedio.....	79
4.3 Carbono fijo.....	79
4.4 Poder calorífico	79
4.5 Temperatura de llama para PPNT y relación aire combustible.....	80
4.6 Resultados de las emisiones por medio de la combustión de PPNT.....	85
4.7 Resultados prueba DSC.....	95
4.8 Potencial energético	96
5. Conclusiones	98
Referencias	100

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Lista de tablas

Tabla 1. Análisis del porcentaje de humedad.....	77
Tabla 2. Prueba de volátiles	77
Tabla 3. Resultados prueba de cenizas	79
Tabla 4. Relación A-C y exceso de aire	82
Tabla 5. Temperaturas teóricas vs experimentales.....	84
Tabla 6. Comparación de resultados de emisiones entre el PPNT y la norma de calidad de aire	94

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Lista de figuras

Figura 1. Contexto de contaminación.....	18
Figura 2. Organigrama del aprovechamiento de plásticos post uso.....	20
Figura 3. Planta térmica de potencia	23
Figura 4. Residuos de la combustión	25
Figura 5. Clasificación del tipo de procesos de reducción de residuos sólidos por medio termodinámicos	39
Figura 6. Elementos que hacen parte del proceso de incineración	41
Figura 7. Tipos de pirolisis y % que se obtenido para cada uno de los combustibles	44
Figura 8. Distribución de las capas de un tapabocas.....	47
Figura 9. Cadena polimérica que compone el polipropileno	48
Figura 10. Técnica de spunlaid para la manufactura de la tela no tejida	50
Figura 11. Técnica de obtención de la capa meltblown	51
Figura 12. Transiciones térmicas medidas por DSC	52
Figura 13. DSC por flux de calor	54
Figura 14. Esquema DSC por compensación de energía	55
Figura 15. Materia objeto de investigación.....	58
Figura 16. Muestras para el secado	59
Figura 17. Horno de mufla.....	59
Figura 18. Muestras carbonizadas.....	60
Figura 19. Balanza Pioneer PX244/E.....	61
Figura 20. Horno de biomasa (Industrias Acuña LTDA)	67
Figura 21. Anemómetro térmico WK026	70
Figura 22. Caja de análisis de gases modelo TESTO 350	71

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Figura 23. Sonda modular incorporada para cálculo de las emisiones	71
Figura 24. Niveles máximo-permisibles de contaminantes criterio aire.....	73
Figura 25. Calorímetro diferencial.....	74
Figura 26. Prueba de cenizas.....	78
Figura 27. Prueba utilizando 30 gramos de muestra	80
Figura 28. Prueba utilizando 45 gramos de muestra	81
Figura 29. Prueba utilizando 60 gramos de muestra	81
Figura 30. Emisión del %CO ₂ presente durante la prueba de combustión con apertura máxima de la compuerta de aire de combustión	86
Figura 31. Emisión del %CO ₂ presente durante la prueba de combustión con apertura mínima de la compuerta de aire de combustión.....	86
Figura 32. Emisión del %O ₂ presente durante la prueba de combustión con apertura máxima de la compuerta de aire de combustión	88
Figura 33. Emisión del %O ₂ presente durante la prueba de combustión con apertura mínima de la compuerta de aire de combustión.....	88
Figura 34. Emisión de los óxidos de nitrógeno en mg/m ³ presente durante la prueba de combustión con apertura máxima de la compuerta de aire de combustión.....	89
Figura 35. Emisión de los óxidos de nitrógeno en mg/m ³ presente durante la prueba de combustión con apertura mínima de la compuerta de aire de combustión	90
Figura 36. Emisión del CO en mg/m ³ presente durante la prueba de combustión con apertura máxima de la compuerta de aire de combustion	91
Figura 37. Emisión del CO en mg/m ³ presente durante la prueba de combustión con apertura mínima de la compuerta de aire de combustión.....	91

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Figura 38. Emisión del SO ₂ en mg/m ³ presente durante la prueba de combustión con apertura máxima de la compuerta de aire de combustión	93
Figura 39. Emisión del SO ₂ en mg/m ³ presente durante la prueba de combustión con apertura mínima de la compuerta de aire de combustión	93
Figura 40. Resultados DSC	95

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Lista de anexos

Estos anexos se encuentran en la carpeta que corresponde al proyecto de grado en la plataforma de la Universidad Industrial de Santander

ANEXO A - Marco normativo en el aprovechamiento, tratamiento y disposición final de los residuos generados

ANEXO B - Distribución departamental de la producción en toneladas de residuos diarios en Colombia

ANEXO C – Hoja de datos y ficha técnica del Analizador de gases industrial TESTO 350

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Resumen

Título: Evaluación del potencial energético de los residuos médicos desechables (PPNT) como materia prima en un proceso de combustión.

Autores: Andrés Felipe Luna Grisales, Juan Angel Moreno Jaimes.

Palabras clave: Potencial energético, combustión, residuos médicos desechables, polipropileno.

Descripción:

Después de la pandemia el uso diario de tapabocas y productos médicos desechables genero un aumento del contenido de residuos plásticos, de esta manera se vio como un reto innovador el uso de este tipo de residuos como materia de combustible, por lo cual se decidió estudiar el polipropileno en forma de tela no tejida (PPNT) para determinar su potencial energético a través de una caracterización térmica del material por medio de pruebas experimentales.

Se realizó un análisis próximo con una adaptación a la norma ASTM-D3172 para las pruebas de humedad, volátiles y cenizas, obteniendo un porcentaje de humedad de 0,0168%, un contenido de volátiles del 99,66%, un contenido de cenizas de 0,3066% y un contenido de carbono de 0,0166%, se calculó el poder calorífico superior (PCS) del PPNT mediante la correlación de Parikh obteniendo el valor de 15,5405 MJ/kg, se calculó el PCI por medio del PCS obteniendo el valor de 12,6925 MJ/kg, mediante el modelo teórico de la temperatura de llama se estudió el comportamiento de la temperatura variando la relación aire-combustible obteniendo una relación máxima de 86,23 para 30 gramos y una mínima de 30,18 para 60 gramos, se determinó la temperatura teórica y se calculó la eficiencia del proceso obteniendo en apertura mínima 49% y apertura máxima un 80%, con fines ambientales se estudió las emisiones de la combustión con un analizador industrial Testo 350 comparando con la norma de calidad de aire en Colombia obteniendo para una muestra de 60 g los valores de un 21% de CO₂, 4% de O₂, 172 mg/m³ de NO_x, 308 mg/m³ de SO₂ y 8142 mg/m³ de CO, por último se calculó el potencial energético utilizando una cuantificación del polipropileno y junto al poder calorífico se obtuvo un valor energético de 6621 MW.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Abstract

Title: Evaluation of the energy potential of disposable medical waste (PPNT) as material in a combustion process.

Authors: Andrés Felipe Luna Grisales, Juan Angel Moreno Jaimes.

Key words: Energy potential, combustion, disposable medical waste, polypropylene.

Description:

After the pandemic, the daily use of mouth masks and disposable medical products generated an increase in the content of plastic waste, thus it was seen as an innovative challenge to use this type of waste as fuel material, so it was decided to study polypropylene in the form of nonwoven fabric (PPNT) to determine its energy potential through a thermal characterization of the material by means of experimental tests.

A proximate analysis was carried out with an adaptation to the ASTM-D3172 standard for moisture, volatiles and ash tests, obtaining a moisture content of 0.0168%, a volatile content of 99.66%, an ash content of 0.3066% and a carbon content of 0.0166%, the higher heat value (HHV) of PPNT was calculated using the correlation of Parikh, obtaining a value of 15.5405 MJ/kg, the LHV was calculated using the HHV, obtaining a value of 12.6925 MJ/kg, using the theoretical model of the flame temperature, the behavior of the temperature was studied by varying the air-fuel ratio, obtaining a maximum ratio of 86, 23 for 30 grams and a minimum of 30.18 for 60 grams, the theoretical temperature was determined and the efficiency of the process was calculated obtaining in minimum opening 49% and maximum opening 80%, for environmental purposes the combustion emissions were studied with an industrial analyzer Testo 350 comparing with the air quality standard in Colombia obtaining for a sample of 60 g the values of 21% of CO₂, 4% of O₂, 172 mg/m² of O₂, 172 mg/m³ of O₂, 172 mg/m³ of O₂, 172 mg/m³ of O₂, 6925 MJ/kg, 4% of O₂, 172 mg/m³ of NO_x, 308 mg/m³ of SO₂ and 8142 mg/m³ of CO. Finally, the energy potential was calculated using a quantification of polypropylene and, together with the calorific value, an energy value of 6621 MW was obtained.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Introducción

Durante la pandemia una importante variante de la contaminación en filtraciones y mares fue desarrollada a raíz del coronavirus, el uso diario de tapabocas y productos médicos de uso diario desechados terminan en aguas residuales o campos de desecho generando toneladas de desecho continuo. Productos que la mayoría del tiempo no son desechados correctamente y que según estudios esto causa que tarden en descomponerse naturalmente entre 300 y 400 años, con la introducción en la reactivación económica y la implementación de presencialidad en la mayoría de los sectores se estima un aumento en el desecho de tapabocas y diferentes productos médicos desechables.

Por tanto, es indispensable el uso de una herramienta de la ingeniería para confrontar el aumento en la contaminación por desecho de tapabocas, de esta manera se ve como un reto innovador el uso de desechos médicos como materia prima para evaluar su potencial energético como combustible, el análisis y la caracterización se realizará con los equipos que se encuentran en el laboratorio de combustión de la escuela de Ingeniería Mecánica y un equipo termogravimétrico que se encuentra en el centro integrado de laboratorios (CILIQ) de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

Los desechos médicos serán caracterizados y estudiados por medio de pruebas experimentales que den paso a los métodos de combustión que nos permitirán realizar una evaluación energética a él polipropileno en forma de tela no tejida (PPNT) con el fin de una conclusión investigativa enfocada en el uso de PPNT como combustible y desecho plástico reutilizable.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

- Evaluar el potencial energético de los residuos médicos desechables por medio de un proceso de combustión

1.2 Objetivos específicos:

- Determinar las características fisicoquímicas del PPNT por medio de un análisis próximo utilizando una adaptación a la norma ASTM D3172-13 (2021).
- Determinar el comportamiento de la temperatura mediante la variación de la relación aire/combustible por medio de la quema directa del material objeto de estudio.
- Determinar la composición de las emisiones resultantes del proceso combustión del PPNT.
- Definir la estabilidad térmica del PPNT a través de la técnica de análisis termogravimétrico (TGA) aplicando la norma ISO 11358.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

2. Marco teórico e investigativo

El propósito de este capítulo es incluir las definiciones conceptuales necesarias para poder comprender a cabalidad la investigación contenida en el presente trabajo. Se realiza un análisis de los conceptos claves del presente proyecto teniendo en cuenta el objetivo general.

2.1 Estudio de la contaminación en Colombia:

Según cifras investigadas en internet de diferentes fuentes incluyendo la superintendencia de servicios públicos domiciliarios se estima que Colombia contamina más de 12 millones de toneladas al año en donde Santander hace parte de los departamentos que sobrepasan las 5000 toneladas/día (ver anexo A), las cifras entregadas por este ministerio en el 2020 señalan que Colombia al día dispone de 32.580 toneladas/día de lo cual se debe aclarar son residuos sólidos (la política nacional que se usa para realizar la gestión de residuos sólidos en Colombia son principalmente la constitución del 91, la ley 99 del 1993, la ley 192 de 1994 y el documento CONPES 2750 del ministerio del medio ambiente (Ministerio del medio ambiente, 1993)), esta cantidad se ha visto incrementada un 0.89% con respecto al 2019 lo cual estimando un cálculo se podría decir que estamos hablando de 40 mil toneladas/día en un día promedio de 2022, a si mismo el departamento administrativo nacional de estadístico (DANE) gestiona que Colombia cuenta con una tasa de reciclaje equivalente al 11.82 % Total neta, pero esta tasa de reciclaje es aplicada a la masa total de basuras siendo esta casi 4 millones de toneladas recicladas.

En un hogar promedio el 26% de desechos se estiman que sean productos plásticos, de las cuales el 70% de los mismos hogares colombianos no reciclan (Ministro Carlos Eduardo Correa, 2022) teniendo en cuenta esto y que en un marco general Colombia produce 1.4 millones de toneladas de material plástico por año (entre estos polipropileno, PVC, polietileno, etc.) desde

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

la escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad Industrial de Santander se plantea como problemática la necesidad de aumentar proyectos que tienen como fin encontrarle solución a la contaminación dejada por el plástico en Colombia ya que esto representa una actividad con altísima relevancia y de un gran aprovechamiento energético tanto así que muchos medios informativos ya no se refieren la problemática de las basuras como contaminantes si no como fuentes de aprovechamiento energético es por eso mismo que numerosas organizaciones del sector productivo colombiano han centrado y focalizado sus acciones con intenciones innovadoras centradas en el reciclaje y regeneración de su materia prima.

Es bueno en esta investigación para poder dar un contexto social entender que es lo que pasa con las basuras y el aprovechamiento de estas mismas en el mundo, el sudeste asiático durante muchos años se ha hecho cargo de muchas de las basuras del mundo, china en 2016 recibió en términos de residuos plásticos 600.000 toneladas por mes, siendo este la potencia que durante el último siglo recibe las toneladas de basura que produce el mundo industrializado de los demás con Estados unidos, Alemania y reino unido a la cabeza de los más contaminantes (Barragán, 2019), residuos que no se ven direccionados directamente dentro de una cadena de aprovechamiento, en las últimas siete décadas se aproxima que se generó mínimo nueve billones de toneladas de residuos donde siete billones no pasaron por una red de reciclaje ni aprovechamiento si no que terminaron en el ambiente (Greenpeace, 2018), perdiendo una cantidad de dinero inimaginable, en donde aun estando en los tiempos de la gran concientización sobre el reciclaje y el medio ambiente sigue siendo igual una industria poco conocida pero muy rentable produciendo mundialmente 500 mil millones de dólares, solo en China el año 2018 se alcanzó una cifra de ganancia de 17.000 millones de dólares con productos producidos del reciclaje de la contaminación industrial (BBC, 2018) pero esto es gracias a que el gobierno de esos países que están en la punta del aprovechamiento gastan e invierten en reciclaje grandes

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

cantidades cosa que no sucede en los países “subdesarrollados” como Colombia donde vemos que en términos de producción y aprovechamiento de biomasa Europa y Asia nos superan por mucho.

2.2 Plásticos en Colombia:

En materia de medioambiente debemos tener en cuenta que post pandemia se ha generado aumento de contaminantes plásticos debido a la protección de las bacterias y organismos generadores del COVID-19, causando que en países como Colombia que no tienen un plan de gestión de basuras demasiado amplio y estricto (el cual se puede ver su clasificación y disposición en el anexo B) aumentara descontroladamente la contaminación de cierto tipo de productos.

Dentro de este tipo de productos se ve contemplado mascarillas faciales o tapabocas, batas, gorros, botas desechables para los zapatos, caretas protectoras, guantes, envases para productos de limpieza como antibacteriales. Destacando sobre estos los cubrebocas los cuales tienen un tiempo estimado de degradación de casi 300 años.

En el mundo hay 9000 millones de toneladas de plástico producidas a lo largo de su historia de la cual solo el 9% se ha reciclado llevándonos a una estimación en donde en el 2050 habrá unos 12 mil millones de toneladas de basura plástica (Semana, 2021) dentro de esta cantidad de plástico existe un porcentaje que supera a los demás y son los plásticos de un solo uso, los plásticos de un solo uso tienen una gestión diferente en Colombia las cuales se rigen ahora por la ley 274 de 2020 que prohíbe bajo ciertos parámetros la fabricación, importación, exportación y comercialización de los plásticos de un solo uso dentro del territorio nacional pero se debe tener en cuenta que no todos los plásticos están contemplados dentro de esta ley ya que elementos de protección en contra del COVID-19 no hacen parte de ese selecto grupo lo cual

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

abre una puerta al aprovechamiento masivo de esta materia que más que contaminación pasan a ser herramientas las cuales están teniendo como destino el desaprovechamiento, según la ONU el 75% de los guantes, tapabocas y botellas desinfectantes terminaron en el mar en el primer año de pandemia lo cual aproximadamente equivale a 1560 millones (Martínez, 2021), plásticos los cuales a pesar de que hoy en día su uso se ha visto reducido no se pueden descartar como parte importante de la vida cotidiana de los ciudadanos.

Figura 1

Contexto de contaminación



Nota. Figura que representa el contexto social de la contaminación dada para los tapabocas la cual es la materia de estudio en esta investigación. Fotografía de Fernando Ponzetto tomada de <https://www.elpais.com.uy/informacion/salud/eeuu-inmunizados-tapabocas-uruguay-esto-explico-infectologo-medina.html>

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Por tanto, si se quiere identificar la manera de reducir las cifras contaminantes bajo una acción de aprovechamiento tipo ingenieril se debe identificar qué tipo de plásticos hacen parte de esa contaminación y es que antes de enumerar los más usados en las plantas de reciclaje en Colombia debemos entender que el plástico se dividen en 3 tipos los cuales van a dictar su comportamiento y por ende afecta directamente la forma en la que pueden aprovecharse, en un principio están los termoplásticos, los cuales son ese tipo de plásticos que son moldeables y deformables en temperaturas bajas o ambientes, los mismos que cuando se calientan y alcanzan su temperatura de rompimiento de enlace realizan un cambio de fase a un líquido viscoso entrando en endurecimiento por estado de transición vitreo cuando proceden a enfriarse, este tipo de plásticos tienden a moldearse y refundirse más de una vez antes de cambiar sus propiedades físicas por lo tanto son bastante adecuados para un proceso de reciclado antes de que pierda su capacidad de reutilización.

Después están los termoestables los cuales se diferencian de los termoplásticos debido a que estos no pueden fundirse (solamente cuando se manufacturan) ya que una vez adquieren temperaturas bajas o ambientes no realizan fundición cuando se calienta si no que se queman dificultando un proceso de reciclado, este tipo de plásticos tienden a ser rígidos y carecer de carácter de deformación siendo bastante resistentes al calor, por último se encuentran los elastómeros los cuales basados en su mismo nombre tienen una capacidad elástica que hace que puedan recuperar su forma inicial después de ser totalmente deformados aunque no tienen gran relevancia en el campo del reciclaje y/o re aprovechamiento de este tipo de materia prima.

En Colombia se tiene que los plásticos que más son aprovechados por las plantas de reciclaje son los siguientes:

- PET: tereftalato de polietileno

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

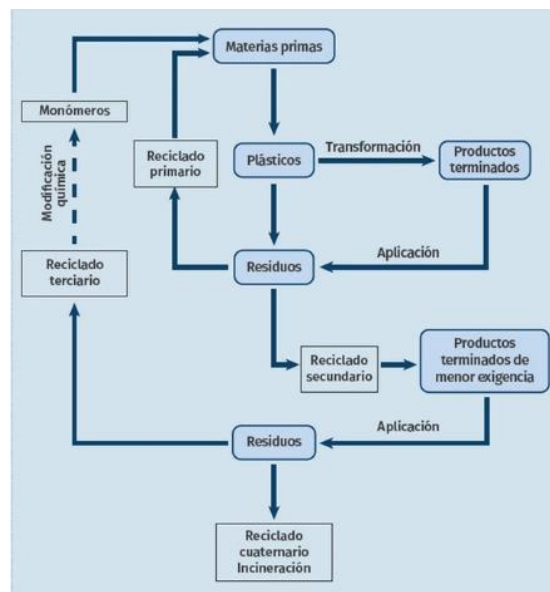
- HDPE: polietileno de alta densidad
- PVC: policloruro de vinilo
- LDPE: polietileno de baja densidad
- PP: polipropileno
- PS: poliestireno

Debido a que el contaminante más grande de los elementos pandémicos son los tapabocas y estos están compuesto por polipropileno para objeto de este proyecto de investigación se tomara como materia a investigar el polipropileno en forma de tela no tejida.

2.2.1. Reaprovechamiento de los plásticos en la industria

Figura 2.

Organigrama del aprovechamiento de plásticos post uso



Nota. Organigrama que corresponde a la disposición final de los residuos urbanos y los tratamientos a los que son sometidos en sus diferentes etapas, figura tomada de <https://www.pt-mexico.com/articulos/rutas-opcionales-para-el-reciclado-de-materiales-plasticos>

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

En la industria existen diferentes maneras de aprovechar los residuos plásticos y poder obtener la mayor cantidad de ganancia de plásticos que ya tuvieron su uso o cumplieron sus ciclos de vida, estas técnicas van ordenadas según la transformación que permita el plástico y la inicial junto la más viable en términos de eficiencia es:

2.2.1.1 Reciclado primario. El proceso de reciclado primario también recibe el nombre de proceso de re-extrusión el cual básicamente trata de la reincorporación de cierto tipo de plásticos a la extrusión como si fuera material virgen, principalmente es utilizada para materiales que no están expuestos a contaminantes difíciles de eliminar y tiende a ser mezclada con resina o materia nueva, consiste en la separación de los plásticos por estructura, densidades, etc. (para que la temperatura del proceso sea la adecuada y las características térmicas no se vean afectadas) luego se desinfecta y por último culmina en la re-extrusión.

2.2.1.2 Reciclado Secundario. Procedimiento por el cual materiales como residuos plásticos que no son aptos para el reciclado primario deben ser reprocesados por completo para llegar a obtener el producto final, se realiza mediante reciclado mecánico para la re-obtención de plástico residual eliminando la necesidad de separar o limpiar se trituran y se proceden a fundir las piezas todas dentro de un gran extrusor que después son sujetas a un baño de agua y manufacturadas a su merced.

2.2.1.3 Reciclado Terciario. Diferente a los dos anteriores procesos puesto que involucra un cambio Físico Químico donde la principal tarea es descomponer térmicamente a temperaturas altas o adecuadas según el tipo de plástico rompiendo las cadenas del polímero en su variante monómero.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Las técnicas de reciclado terciario más implementadas son la **Pirolisis** y la **Gasificación** las cuales consisten en realizar estudios pirolíticos para poder llegar a la descomposición parcial o total de los productos solidos por medio de calentamiento directo e indirecto.

Esta técnica será explicada a mayor detalle ya que representa la técnica principal que fue utilizada en este proyecto de investigación, esto con el fin de analizar por medio de la termodinámica los resultados y el comportamiento obtenido para nuestra materia de estudio en este tipo de procesos.

2.2.1.3 Reciclado Cuaternario. En este tipo de proceso no hay recirculación ni ningún tipo de recuperación de la materia prima, solamente se utilizan técnicas de incineración para aprovechar la posible energía térmica que se puede obtener del calentamiento directo de los plásticos en uso y o la simple desaparición del plástico tomado como contaminante.

2.3 Combustión de los plásticos

La combustión en cualquier material ocurre mediante una reacción química en la cual se quema cualquier sustancia con el fin de formar nuevos compuestos y hacer desaparecer otros. En esa reacción están involucrados los **combustibles** (el cual para nuestro caso es un polímero termoplástico) que son cualquier tipo de material que libera energía al quemarse y el oxígeno, que es llamado el **comburente**. Los combustibles están compuestos principalmente de carbono e hidrógeno por lo que reciben el nombre de combustibles hidrocarburos

Este proceso tiene una alta importancia en la operación de todo tipo de plantas a nivel mundial pues la gran mayoría de procesos industriales requieren calor por lo que se hace necesario estudiar dichos procesos con el fin de minimizar riesgos y daños durante el proceso,

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

asimismo es de vital importancia hacer un uso eficiente de los combustibles que son parte diaria de nuestra sociedad.

Figura 3.

Planta térmica de potencia



Nota. Visualización de una planta de aprovechamiento de energía térmica para la generación de potencia, figura tomada de

https://www.nyb.com/images/applications/shutterstock_262394165.jpg

Para que un combustible sea valioso en la industria es necesario saber qué capacidad tiene de liberar calor durante la combustión, esta capacidad se conoce como poder calorífico y está presente en cualquier sustancia que sea utilizada en el proceso.

Los combustibles sólidos más comunes son el carbón, el coque, la madera, el bagazo, la caña de azúcar y la turba. Entre los líquidos se encuentran el petróleo crudo y sus derivados como la gasolina, el alcohol, el aceite y la bencina. Los combustibles gaseosos más utilizados

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

son el gas natural, mezcla de metano, etano, propano y butano, el acetileno que se utiliza en el soplete y el hidrógeno, empleado para impulsar vehículos espaciales (Ambientum, 2022).

Los plásticos que hacen parte de los termoplásticos tienen características diferentes en cuanto a su comportamiento térmico ya que el PPNT se verá sometido a diferentes etapas de diferente conformación, la viscoelasticidad la cual es una propiedad de la reología cuando un material en su degradación presenta tendencias tanto elásticas como deformables e influye directamente sobre los enlaces de las cadenas de estos polímeros y cuando ocurra el inicio del proceso de combustión y la temperatura empiece a elevarse la composición de los enlaces tendrá un comportamiento viscoso pero cuando aún está en una zona considerada de bajas temperaturas aumenta su viscosidad y se descompone rápidamente el material como un sólido rígido y más aun teniendo en cuenta que este tipo de PPNT no tiene retardante de llama.

Encontraremos en el estudio que hay una temperatura en la cual la cadena principal se destruye y se alcanza la temperatura de degradación en donde se supera la temperatura de conformación de este plástico en donde posteriormente con el creciente aumento iniciara un término que será nombrado más adelante varias veces el cual es el goteo, y es que algunos polímeros presentan esta cualidad la cual está asociada directamente a un proceso de combustión ya que los enlaces del plástico se debilitan tanto que se pasa a un líquido inflamable de alta temperatura antes de que todo el material combustible se consuma.

Esto quiere decir que cuando realicemos los distintos métodos de combustión a los cuales será sometido este estudio, se tendrá resultados que cambiaran según se consuma su fase sólida y cambie a esa fase líquida gracias al goteo (Castellanos, 2014).

Se espera que la producción de plástico se duplique en los próximos 20 años, de acuerdo con un reporte emitido por el foro económico mundial. Mientras tanto, las tasas de reciclaje de plástico se mantienen alrededor de 30% en Europa, solo un 9% en Estados Unidos y cercanas al

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

0% en gran parte del mundo en desarrollo (Royte, 2019). La quema de plásticos para producir energía no es del todo descabellada puesto que los plásticos son compuestos de hidrocarburos, sin embargo, estudios han demostrado que reciclar plástico ahorra más energía que quemarlo puesto que el material reciclado se puede utilizar para formar nuevamente productos sin necesidad de gastar millones en la extracción de petróleo, adicional a ello, las plantas térmicas de potencia que se encargan de transformar los residuos plásticos en energía emiten a la atmosfera cantidades de contaminantes tóxicos al aire (principalmente CO₂) como se observa en la figura 4, lo que significa que para que pueda ocurrir un proceso sin daños al medio ambiente sea necesario la utilización de depuradores especializados en los productos de la combustión del plástico.

Figura 4.

Residuos de la combustión



Nota. El grafico ejemplifica la situación vivida en muchas industrias acerca de las emisiones desmesuradas que son entregadas al ambiente sin la regulación adecuada, figura tomada de <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/a-partir-de-residuos-termoelectricos-obtienen-zeolitas>

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Hasta el momento no se tiene una idea factible que nos permita aprovechar de manera eficiente los gases producidos por la quema de plásticos, sin embargo esta idea toma fuerza día tras día mientras personas alrededor del mundo se preguntan cómo pueden ayudar al planeta a librarse de los plásticos y es que la quema de plásticos es un hecho en muchos de nuestros países subdesarrollados en donde se hace este proceso para algo tan simple como liberar espacio ocupado por las toneladas de basura que se producen día tras día, no cabe duda de que este problema algún día tendrá solución puesto que estamos avanzando hacia una economía circular en donde todo lo que desechamos pueda ser utilizado nuevamente con el fin de no generar más contaminación.

Para lograr un proceso de combustión exitoso es necesario tener en cuenta el **factor de aire** que será explicado a continuación.

Factor de aire: Es el que determina la proporción de comburente y combustible para obtener un buen proceso de combustión es por esto por lo que la combustión depende de él (generalmente el comburente es aire) dado que, si al proceso se le suministra menor cantidad de aire que la requerida el resultado será la presencia de combustible sin quemar en los productos, o por el contrario puede hacerse de manera que la cantidad de aire sea mayor de la requerida lo que ocasionará otro tipo de combustión, estos tipos de combustión son:

2.3.1 Tipos de combustión:

Combustión incompleta: Este tipo de combustión ocurre cuando el factor de aire es menor que la unidad, esto genera que en los humos producidos existan gases combustibles que no fueron completamente oxidados en el proceso, este tipo de combustión no es común ya que el combustible tiene un valor comercial más alto que el comburente (el aire es gratis) por lo que no es recomendable en términos económicos desperdiciar el combustible al producir una

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

combustión incompleta, es por eso por lo que la mayoría de los quemadores operan en exceso de aire.

Combustión neutra: También conocida como combustión estequiométrica y es la combustión que ocurre cuando se da la combustión completa ideal, en donde se emplea la cantidad exacta de oxígeno necesaria para su reacción, este proceso no es posible en la práctica real ya que el mezclado es imperfecto dentro de la cámara de combustión, también se debe tener en cuenta que la disociación aumenta en altas temperaturas lo que afecta también el proceso teórico y casi que únicamente ocurre en ambientes altamente controlados en laboratorios.

Combustión completa: Es el proceso de combustión que ocurre cuando la cantidad de aire suministrada es mayor a la requerida, dado que todo el hidrógeno, carbono y azufre (si lo hay) presente en el combustible se oxidan formando moléculas de H_2O , CO_2 y SO_2 , para lograr el proceso de combustión completo es necesario obtener la cantidad mínima de aire requerido que se conoce con el nombre de **aire estequiométrico**.

2.3.2 Etapas del proceso de combustión

Para la combustión es importante definir que las reacciones químicas ocurridas durante la combustión pueden llegar a ser más complicadas de lo que parecen pues la rapidez con la que suceden dificulta su estudio. Estas reacciones van desde la aerodinámica y difusión molecular hasta la transferencia de calor y todas ellas ocurren casi simultáneamente por lo que el estudio clásico simplifica el proceso enfatizando el resultado final sin prestarle mucha atención a la dinámica del proceso. Generalmente las etapas concebidas en el proceso de combustión son tres, las cuales serán explicadas una por una.

2.3.2.1 Etapa de pre-reacción. Durante esta etapa inicial los hidrocarburos presentes en el combustible se descomponen para poder reaccionar con el oxígeno formando compuestos

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

inestables molecularmente conocidos como radicales. Debido a la inestabilidad de los radicales se producen reacciones en cadena en la que se forman más compuestos de los que se descomponen.

2.3.2.2 Etapa de oxidación. Esta es la etapa del proceso en la cual se genera la mayor parte de la energía térmica de la reacción ya que mientras que el oxígeno reacciona con los radicales formados en la etapa anterior, se genera un desplazamiento violento de electrones.

2.3.2.3 Etapa de formación. En esta etapa se forman las moléculas estables que serán los productos de la combustión resultado de la oxidación por completo de los radicales.

2.3.3 Reacción química del proceso de combustión

En la atmosfera terrestre encontramos una gran variedad de gases que permiten que los procesos químicos que realizamos sean posibles, uno de estos procesos es la oxidación que consiste en combinación del oxígeno con otros elementos produciendo una nueva sustancia que se conoce como óxido, durante este proceso un compuesto cede electrones a otro aumentando su estado de oxidación, estos procesos suelen ser lentos, sin embargo existe un proceso de oxidación que ocurre rápidamente y es llamado combustión. Normalmente el proceso de combustión solo necesita de oxígeno para funcionar, pero este elemento va de la mano con el nitrógeno (en el planeta tierra) entre otros compuestos, formando lo que conocemos como aire atmosférico que es utilizado para este proceso químico, es por esto por lo que en los productos de la combustión podemos encontrar gases como CO₂, CO, SO₂, N₂, H₂O, etc.

2.3.4 Variables significativas en el proceso de Combustión

Durante el desarrollo de este proyecto existen parámetros que se deben tener en cuenta, parámetros que son los factores principales y que afectan directamente el proceso de combustión

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

y la interpretación de los resultados que evidencian el comportamiento del material en estudio, estos parámetros para tener en cuenta son:

➤ *La temperatura*

La temperatura es la variable principal para tener en cuenta en medición de procesos termodinámicos, en este tipo de procesos la temperatura entra en estado estable en el medio en el cual se realice, esa temperatura se debe mantener constante cumpliendo con la intención de que ella no presente un proceso de mayor pérdida de masa y que solo se generen cenizas. Según el producto al cual este expuesto la temperatura se pueden considerar tres estados distintos, bajas temperaturas, medias temperaturas y altas temperaturas.

Esta variable es de vital importancia ya que la calidad de un proceso termodinámico se mide y se evalúa según la relación con la que la temperatura logre acercarse a la temperatura de llama, según la temperatura final de los productos de combustión y también según la temperatura que se considere de referencia o la ambiente ya que la temperatura como variable es la que genera incidencia directamente en el cálculo de potencial de transferencia de calor teniendo en cuenta que entre más rápido se alcance el valor máximo de temperatura mayor será la relación de conversión de energía en trabajo por lo que en un proceso de combustión sea cual sea la finalidad que se plantee analizar es requerido, establecer temperaturas máximas, iniciales, finales y de precalentamiento siendo estas temperaturas la medición tomada para la caracterización de los procesos considerándose constante o en su defecto, variable y que de ser así en todo momento se estará comparando con antecedentes teóricos.

➤ *Tiempo de permanencia*

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Es el tiempo en donde está expuesta la materia prima a utilizar en el proceso reaccionando directamente con el fuego o cantidad de calor, es una variable importante ya que se establece el tiempo exacto en el cual se puede desintegrar la materia que se esté estudiando y es más aun importante en esta investigación ya que el polímero plástico que se estudia es casi en su 100% material volátil generando así que sea superficialmente rápida la manera en la que se consume en su totalidad o se “volatiliza”.

➤ *Materia prima*

La materia prima PPNT planteada en el estudio y con la cual se tiene como objetivo generar la caracterización basada en su aprovechamiento energético bajo posibles distintos métodos de transformación de energía, esta materia prima puede ser cualquier tipo de “combustible” solido el cual contenga carbono e hidrogeno dentro de su composición elemental y que se espere que cuando combustione libere elementos partes de combustibles gaseosos.

Dentro de ellos existe unos elementos que se definen para este proceso como catalizadores, catalizadores que están compuestos por elementos como cenizas de la misma materia prima y poseen elementos los cuales actúan como potenciadores en un proceso de combustión aplicada.

➤ *Reactividad*

La reactividad es el término de la influencia y comportamiento que tendrá el carbonizado frente a diferentes factores que la afectan conjuntamente, como lo son la porosidad (en donde hay cantidad de aire dentro de ella que afectara la reactividad y la forma en la que la combustión ocurre cambia por la reacción frente a su forma física), estructura química la cual obviamente es

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

la que más afecta en la reactividad por los contenidos elementales que posee la materia prima como tal, área superficial etc.

➤ *Cinética química*

Al ser un proceso termoquímico ocurren procesos de cambios fisicoquímicos como lo es la transición de materia prima a material carbonizado la cual en este proceso es extremadamente baja debido a que por el tipo de plástico es casi completamente volátiles y es despreciable en cantidad de carbono fijo. Otro proceso que se aplica a la cinética química es la reducción por medio de la gasificación.

➤ *Velocidad de llama y velocidad de combustión*

Se define a velocidad de llama como la conexión de enlace de la expansión del frente de las llamas en un proceso de combustión, o también se podría decir que es la velocidad de propagación de la llama de manera radial siendo esta la forma en la que ocurre una tendencia de propagación, en términos de combustión aplicada sería el que tan rápido viaja esta llama a un punto de posición específico, y la velocidad de combustión es la rapidez o velocidad que tienen los reactivos químicos en llegar a un punto de posición específico en el frente de la llama.

2.4 El combustible

Combustible es la forma en la que se define cualquier sustancia que proporcione energía (en nuestro caso PPNT), alterando su estado de agregación al reaccionar químicamente con otra, y que pueda ser utilizada para suministrar calor o iluminación se la llama un combustible. “Los combustibles liberan su energía mediante una reacción química, como la combustión, o a través

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

de una reacción nuclear de fisión o fusión” (Charris, 2002). Un combustible básicamente es un depósito en el que se almacena una gran cantidad de energía que puede ser utilizada en cualquier momento, principalmente la energía liberada por los combustibles es energía térmica, pero a su vez también se liberan pequeñas cantidades de energía mecánica, eléctrica y electromagnética.

Los combustibles tienen características termodinámicas como los son el poder calorífico los cuales evalúan directamente su rendimiento como material de producción de energía térmica, es importante resaltar que existen combustibles cuyo propósito hoy en día en la industria ingenieril es el pasar por tecnologías de aprovechamiento para generar otro tipo de combustibles mucho más aprovechables.

Estos combustibles pueden ser clasificados en sólidos, líquidos y gaseosos, en donde directamente para nuestro estudio debemos comprender que el plástico según la transición por descomposición de las cadenas y el goteo explicado anteriormente comprende una fase sólida y una fase líquida en donde para nuestro estudio se contempla que la fase sólida como combustible del proceso de combustión será llevada a cabo durante los primeros minutos con una temperatura media-baja:

Combustibles sólidos: El combustible básico usado comúnmente es y fue la madera, aunque aún es utilizado en muchos lugares del mundo (principalmente para cocinar) ya no se considera una buena fuente de energía ya que su uso involucra la deforestación. También son combustibles sólidos aquellos residuos procedentes de operaciones industriales y agropecuarias como el bagazo y la biomasa, en la industria actual el combustible sólido más utilizado es el carbón que puede ser de origen mineral y vegetal. El carbón de origen mineral es el resultado de un proceso de descomposición en ausencia de oxígeno del material vegetal mientras que el carbón vegetal es el residuo obtenido después de remover los componentes volátiles y el agua presentes en sustancias vegetales (principalmente madera) mediante un proceso de pirolisis.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Combustibles líquidos: Los combustibles líquidos en su gran mayoría son mezclas de hidrocarburos que derivan de la refinación del petróleo. Para su obtención es necesario separarlos mediante procesos térmicos que ayudan a filtrar los diferentes subproductos tales como la gasolina, aceite, queroseno, entre otros. En la actualidad la cantidad de productos fabricados a base de petróleo es inimaginable, lo que hace de este fluido no solo una fuente de combustible muy importante para nuestra sociedad, sino que también aporta materia prima para la fabricación de otros materiales.

Combustibles gaseosos: La búsqueda continua de obtener combustibles que sean rentables para la sociedad ha logrado minimizar la larga lista de gases que han sido utilizados a lo largo de la historia como recurso energético llevando a que el gas natural sea conocido como el principal combustible fósil pensando en el futuro ya que es un gas prácticamente incoloro e inoloro que puede encontrarse fácilmente en la superficie de los pozos petroleros, su principal componente es el metano (un hidrocarburo).

2.5 Emisiones contaminantes en el proceso de combustión:

El reciclaje del plástico en términos generales presenta contribuciones al medio ambiente en comparación de la descomposición en vertederos de basura en donde en estos lugares en donde ocupa el 86% de los plásticos a causa de que solo se recicla el 14% (Greenpeace, 2018) esto ha ocasionado que se estudie la contaminación de este tipo de materiales poliméricos en los cuales se ha estudiado que la degradación puede ocurrir por diferentes caminos como lo son por ejemplo la degradación térmica, química, radiante y biológica dando como resultado en variable tiempo un estimado de 500 años en poder lograr la degradación parcial de un componente plástico de manera “natural” (Posada) por lo que técnicas como la incineración y demás tecnologías nos llevan a el análisis de la contaminación que generan y su beneficio.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Sin embargo, algunos plásticos en procesos de reducción poseen alto contenido de sustancias que contribuyen al avance de los gases de invernadero por lo cual el gobierno de Colombia como todas las entidades de estado se han esforzado por imponer normas que limiten el actuar de las industrias que funcionan bajo procesos termodinámicos (como lo es la RESOLUCIÓN 0910 DE 2008)

Por lo cual es de vital importancia estudiar las emisiones que comúnmente ocurren en la combustión para después poder evaluar y comparar los resultados obtenidos en el PPNT en estudio.

Estas emisiones en los procesos se clasifican según la forma en la que sean generadas, existe un proceso el cual se denomina de emisiones “conducidas” en donde se clasifican la mayoría de procesos de combustión en consecuencia del volumen de gases los cuales se puede decir que son transportados por un conducto o respiradero y son los más comúnmente utilizados en la industria (incluidos procesos de combustión interna, calderas etc.) y por otro lado existen las emisiones “no conducidas” las cuales hacen parte de la clasificación de las emisiones a la atmosfera que no necesariamente son de un proceso de combustión y que puede que tengan correlación con máquinas o procesos a una planta industrial, como lo puede ser trituración o secado de algún compuesto en específico que genere emisiones o a la hora de sintetizar algún material las emisiones producto de este mismo tipo de procesos.

La quema directa de productos médicos desechados como lo es el PPNT, produce la necesidad de cuantificar el impacto en términos de contaminación generada por la combustión en donde se definen los principales gases a considerar en función del estudio de las emisiones en el proceso, en donde se encuentran los óxidos nitrosos, óxidos de azufre, metales como monóxido de carbono.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

2.5.1 Nitrógeno (N_2):

El nitrógeno es el componente de mayor presencia en el aire con casi un 80% en materia de volumen, es un gas inodoro el cual va a ser el principalmente introducido por medio del aire de combustión el cual es una de las principales características del proceso, pero aun así no tiene relevancia en la combustión ya que supera el proceso como un medio inerte en donde su principal final será la de disipador de calor pero la presencia de este nitrógeno tiene problemáticas ambientales al poder formar posibles óxidos de nitrógeno que pueden llegar a ser peligrosos.

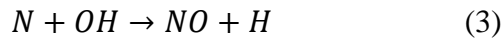
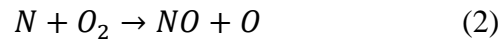
2.5.2 Oxígeno (O_2):

Medir el oxígeno, aunque parezca algo irrelevante es importante para un proceso de combustión ya que la cantidad presente de oxígeno en el gas emitido por la combustión tiene la característica que nos puede indicar si está ocurriendo una reacción en exceso de aire, por lo que sirve de medio para que ocurran diferentes reacciones de formación.

2.5.3 Óxidos de nitrógeno (NO_x):

Los óxidos de nitrógeno definidos como NO_x dónde el principal de todos es el NO y siendo este en porcentaje de óxidos nitrosos el que representa en aproximadamente un 90% de todos los óxidos, su formación ocurre en este tipo de procesos cuando la alta temperatura reacciona con el aire atmosférico introducido para la combustión produciendo así el NO el cual es no combustible y no térmico (Testo Argentina SA, 2018) , el cual si se oxida cuando entra en contacto con el oxígeno genera dióxido de nitrógeno siendo los dos un componente toxico, la formación de este oxido comúnmente se puede dar por tres tipos de reacciones las cuales son:

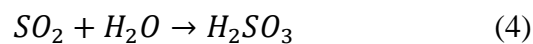
EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT



La residencia de combustión tiene un papel importante en la formación de este tipo de óxidos como también la alta temperatura, cuando la temperatura se vea incrementada mayor será la formación de este tipo de óxidos, cuando se supere los mil grados se dispara directamente la producción de este tipo de óxidos, se debe evitar la posible formación de N_2O el cual se forma a altas temperaturas y es extremadamente peligroso para la el sistema respiratorio e inmunológico de las personas haciendo parte de los efectos de invernadero.

2.5.4 Oxido de azufre (SO_x):

Estos tipos de óxidos surgen de la oxidación del contenido de azufre en el combustible, esto quiere decir que su presencia en las emisiones se dará el tiempo en el cual ocurra la oxidación del combustible, este oxido e también hace parte de los que pueden llegar a ser gases tóxicos siendo irritables para la salud y contribuyen a la formación de ácido sulfuroso el cual es uno de los principales componentes dañinos para las plantas y la vegetación por tanto este tipo de óxidos son altamente restringidos tanto limitados durante su emisión, teniendo una concentración máxima para un puesto de trabajo de cinco partes por millón, su formación ocurre bajo la siguiente reacción:



EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Se debe evitar por completo la alta exposición de este tipo de óxidos porque en ciertos casos puede irritar el sistema respiratorio y en algunos casos ocasionar parada del sistema respiratorio.

2.5.5 Monóxido de carbono (CO):

El monóxido de carbono hace parte de gases normalmente emitidos producto de una combustión incompleta de un combustible por consiguiente eliminar su emisión contribuye directamente al rendimiento del proceso, también es un óxido potencialmente contaminante y en algunos casos aportan a la corrosión, se deben evitar ser emitidos porque puede causar vértigo, confusión, náuseas y pérdida del conocimiento si se está altamente expuesto y su exceso puede llevar al envenenamiento y la muerte (Testo, 2019) la concentración máxima en un lugar de trabajo es de 50 ppm ya que con tan solo 700 ppm puede morir una persona en pocas horas, su reacción básica de formación es la de:



2.6 Reaprovechamiento de la energía:

Durante los últimos años se ha enfocado la mayoría de los procesos ingenieriles a contribuir de alguna manera al mundo ambiental o productivo y se debe entender que el aprovechamiento energético es una tecnología que se centra en el recuperar energía, donde esta recuperación puede variar en base a diferentes factores como lo son el tipo de proceso, la cantidad o calidad de materia prima empleada y también en función de las consideraciones finales que se quieran tener del producto o tipo de energía a generar.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

En las últimas formas de estudio se ha establecido esta metodología como una de las principales para la descomposición de elementos los cuales se desea eliminar generando una ventaja en su propia desintegración, haciendo parte ya de una cadena principal en el aprovechamiento de desechos no recuperables o de un solo uso, por tanto el producto final es algo totalmente diferente ya que el carbón o materia en masa descompuesto por procesos de reducción termodinámica llega a generar una amplia variedad de productos entre los cuales se encuentran los químicos, energía (el cual es el enfoque dado en este proyecto), gas natural y combustible.

2.6.1 Potencial energético:

El potencial energético es la capacidad que tiene un material de transformarse o liberar cualquier tipo de energía con fin de aprovecharla para las necesidades del ser humano. Actualmente el estudio del potencial energético de los distintos materiales creados por el hombre han ido en aumento pues debido a la gran contaminación en el planeta ha surgido un nuevo pensamiento acerca del posible aprovechamiento de los residuos ya sean domésticos, industriales, comerciales o incluso peligrosos. Dicho pensamiento implica pensar en la capacidad que tenemos para aprovechar los residuos que son producidos diariamente ya que se ha demostrado que pueden ser utilizados en la industria para formar combustibles que aporten energía y que además ayuden al proceso de cuidado del medio ambiente. Para transformar dichos desechos en energía tienen que atravesar ciertos procesos físicos o químicos y algunas veces una mezcla de ambos, para nuestro caso de estudio dicho proceso es llamado combustión y será descrito a continuación.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

2.6.2 Aprovechamiento energético de los residuos por medio de tecnologías de combustión

Después de entender el enfoque del aprovechamiento de residuos ambientales se debe explicar las tecnologías las cuales son el siguiente paso después de realizar la caracterización de un material como lo es en nuestro estudio este tipo de plásticos, existen en la industria ciertas tecnologías que se han centrado en el aprovechamiento de estos residuos las cuales tienen como base la combustión para el estudio de su calidad y aprovechamiento energético, y es de vital importancia mencionar esas técnicas actuales las cuales a través de la misma combustión logran generar un producto viable en términos económicos (sea combustible o cantidad de energía liberada), este producto va a depender de no solo el tipo de tecnología si no también los parámetros que se deben tener en cuenta en cada una de estas.

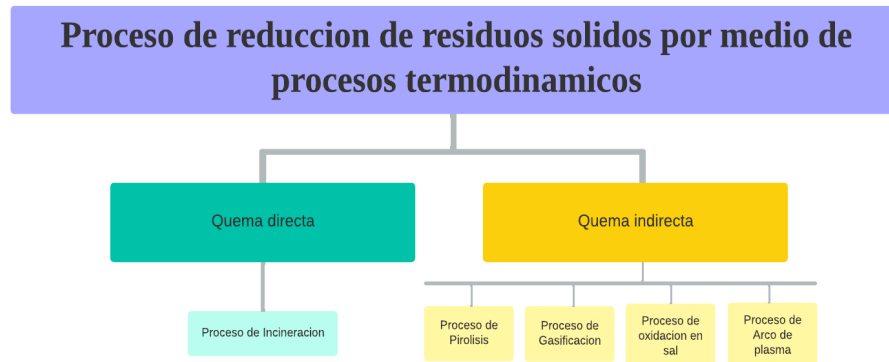
Para la descripción de estas técnicas se deben dividir en dos grupos grandes que abarcan las diferentes técnicas, el grupo que abarca la quema directa con presencia de oxígeno y otro el cual se realiza la técnica de degradación térmica mediante quema indirecta en disminución o ausencia de este mismo elemento.

Para esta investigación se describirá a más detalle la técnica de incineración, pirolisis y gasificación las cuales son técnicas que hacen parte directamente de las principales tecnologías utilizadas en el aprovechamiento del desecho.

Figura 5.

Clasificación del tipo de procesos de reducción de residuos sólidos por medio termodinámicos

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT



Nota. Mapa realizado con el fin de que se pueda evidenciar directamente la clasificación de los procesos según su disposición final a través de medios termodinámicos.

2.6.2.1 Proceso de incineración. Esta técnica consiste en la incineración de valorización energética bajo una combustión controlada, pero sigue siendo una técnica que tiene como objetivo principal la eliminación y/o reducción de volumen de los residuos sólidos que se estén tratando, en Colombia es el proceso más utilizado para el tratamiento de residuos médicos desechables y debe registrarse muy claramente bajo el Decreto 2676 del 22 de diciembre del 2000 el cual se enfoca en la clasificación e incineración de únicamente residuos médicos.

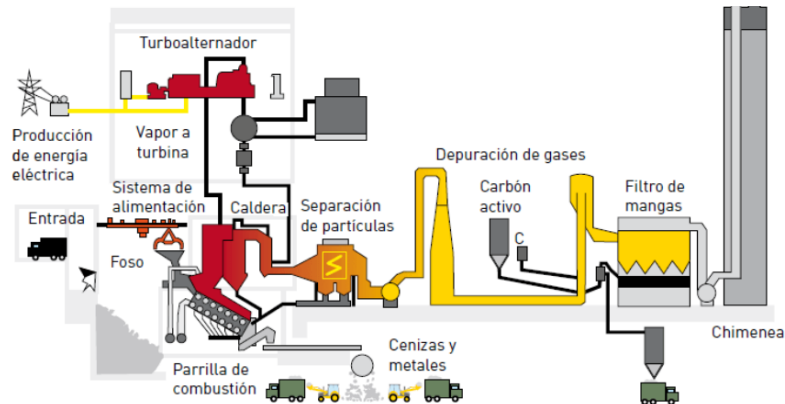
Muchas veces este tratamiento térmico es con el fin de realizar la combustión completa del material y se realiza comúnmente en hornos dando como resultado final cenizas, gases y partículas en donde se puede buscar una función o aprovechamiento para la cantidad de calor que libera la separación termodinámica de estos elementos en donde su principal enfoque será en producir energía (además que es el que comúnmente es aplicado a el tipo de material en estudio ya que este proceso cumple con una etapa de esterilización de los materiales), este tratamiento ocurre bajo el procedimiento de la oxidación química de los residuos que se aprovechen en

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

exceso de aire produciendo en la mayoría de “combustibles” hidrogeno, carbono, metales pesados, halógenos, nitrógeno, entre otros.

Figura 6.

Elementos que hacen parte del proceso de incineración



Nota. esta figura representa gráficamente los componentes que hacen parte de una planta de incineración, la figura fue tomada del blog de Greene Enterprise <https://greene.es/incineracion-y-gasificacion-diferencias-y-similitudes/>

Como parámetros para que el proceso ocurra de manera más optimizada es necesario una atmosfera oxidante, al igual que un proceso de agitación en donde la materia sea agitada ocasionalmente para que no se generen agrupamiento de desechos.

Para llegar a la reducción previamente se contemplan varias etapas en las cuales están:

Etapas de secado: en donde el Residuo a incinerar (RI) se precalienta a través de un proceso por medio de un aire precalentado por medio de radiación y de transferencia de los gases de combustión en donde se busca una temperatura por encima de los 60 grados con el fin de que se elimine el agua presente y eliminar así la humedad.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Etapa de volatilización: es la etapa donde los RI se descomponen térmicamente y se genera la cantidad de masa volátil que es el % más alto de los residuos sólidos, esta etapa empieza sobre los 200 °C y verdaderamente se consume completamente sobre los 500 °C

Etapa de combustión: es la etapa donde se consume los volátiles llegando a una temperatura superior a 1000 °C y ocurre un exceso de aire de característica turbulenta dejando un material residuo que posee un carbono fijo y material sobrante inerte y en esta etapa ese carbón se exige a una combustión completa durante 1 hora aproximadamente para reducir la mayor cantidad posible los RI.

Cabe resaltar que las cenizas resultantes del proceso pueden llegar altamente contaminantes y por tanto deben de ser extraídas por una sección específica para ellas, también es importante mencionar que en este tipo de procesos se reduce la cantidad de metano la cual emiten las basuras bajo destino de relleno sanitario (Arqhys, 2012).

2.6.2.2 Proceso de gasificación: La gasificación es una tecnología que se centra en el recuperar energía donde esta recuperación puede variar en base a diferentes factores como lo son el tipo de proceso, la cantidad o calidad de materia prima empleada y también en función de la consideraciones finales que se quieran tener del producto a generar (gas de síntesis), esta gasificación es un proceso termoquímico en el cual se genera gas combustible a partir de un material combustible, este gas producto tiene un poder calorífico bajo o medio comparado con el gas natural o el hidrógeno que son algunos de los combustibles gaseosos más utilizados. Dicho producto contiene CO, H₂, CO₂, CH₄, N₂ entre otros componentes, estos compuestos se encuentran en distintas proporciones dependiendo de la composición de la materia prima, el agente gasificante, el gasificador y la relación agente gasificante/materia prima. El gas que es producido se conoce como gas de síntesis y puede ser aprovechado para producir electricidad o

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

energía térmica a través de procesos de combustión. Para este proceso se pueden identificar diferentes tipos de gasificadores en función de la temperatura

Para que un proceso de gasificación esté completo se deben completar por completo cuatro fases que son: secado, pirolisis, combustión y reducción.

Secado: La materia utilizada en el proceso es calentada y secada utilizando el calor producido por las reacciones de la combustión por lo que se evapora parte de la humedad inicial. Es importante que la materia prima tenga un contenido de humedad entre el 7% y el 20%, de no ser posible es necesario un pre-secado para eliminar tanta humedad como sea posible antes de introducir la materia prima en el gasificador.

Pirolizado: Es la etapa en la cual se desprenden los gases combustibles más volátiles, al ser un proceso de descomposición térmica casi en completa ausencia de oxígeno algunos de dichos gases no se queman y se convierten en alquitranes, además de producir gases se produce un residuo sólido conocido como carbón vegetal.

Combustión u oxidación: Es en esta zona en dónde se empieza a mezclar el agente gasificante con el residuo sólido produciendo así el calor necesario para llevar a cabo las etapas de pirólisis y secado además de ser un suministro de calor para mantener la temperatura. Es importante que las reacciones endotérmicas se mantengan a la temperatura adecuada pues de no ser así se aumentarían las pérdidas en el gasificador lo que se verá influenciado en la obtención de un menor poder calorífico en el gas obtenido.

Reducción: Esta etapa del proceso se lleva a cabo en paralelo con la combustión a pesar de necesitar los productos producidos en la combustión, esto lo hace la etapa más compleja pues envuelve las reacciones químicas entre todos los gases producidos dentro del sistema, cabe resaltar que la gasificación del residuo sólido es el producto más importante en la reacción.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Una de las ventajas dentro de esto es que al ser un proceso de termo reducción por medio del rompimiento de enlaces esos componentes como nitrógeno, azufre o mercurio presentan una facilidad de ser eliminados y limpiados de nuestro gas producto (incluido el CO₂ presente dentro de este).

El gas de síntesis es un gas que normalmente está compuesto por una mezcla conjunta de monóxido de carbono y de hidrogeno, pero puede poseer diferentes composiciones en condición de los factores que se utilicen en el gasificante

2.6.2.3 Proceso de Pirolisis. La pirolisis es un proceso el cual a diferencia de la incineración es una degradación térmica en ausencia de oxígeno en donde ocurre su descomposición térmica sin producir reacciones de combustión y las sustancias expuestas a su degradación tienen como objetivo de aprovechamiento el generar combustible gaseoso, líquido y sólido aunque es importante aclarar que la pirolisis tiene diferentes condiciones las cuales favorecen a que se forme diferentes productos como lo vemos en la siguiente figura:

Figura 7.

Tipos de pirolisis y % que se obtenido para cada uno de los combustibles

Modo	Condiciones	Líquido	Carbón	Gas*
Gasificación	~ 800 °C	5 %	20 %	85 %
Flash/rápida	~ 500 °C, corto tiempo de residencia de vapor caliente ~1s	75 %	12 %	13 %
Intermedio	~ 500 °C, tiempo de residencia del vapor caliente ~10 – 30 s	50 %	25 %	25 %
Carbonización lenta	~ 400 °C, largo tiempo de residencia del vapor ~horas - días	30 %	35 %	35 %
Torrefacción lenta	~ 290 °C, tiempo de residencia de sólidos ~30 min	-----	82 %	18 %

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Nota. Esta figura muestra las condiciones de temperatura, tiempo de permanencia y porcentajes del producto final de las diferentes tecnologías de aprovechamiento térmico, la figura fue tomada de Technologies, Risks and Rewards: Imeche Conference Transaction 2003-3 (Imeche Event Publications)”. Professional Engineering Publishing y Wiley: Bury St Edmunds 2003

Este proceso se produce en tres etapas en donde la primera es la dosificación que consta de la alimentación de materia prima luego la transformación del desecho y por último la obtención del combustible, esto ocurre sin oxígeno en donde el único que existe es el oxígeno presente en el residuo que se utilice, es un proceso muy similar a la gasificación en donde sus temperaturas son menores llevando el horno de pirolisis a una temperatura de trabajo de entre 300 y 800 grados centígrados.

Es una técnica que está centrada directamente en producir cantidad de energía a través de combustibles que se generan por la degradación de los desechos, el gas resultante por el tipo de proceso es un gas que contiene una composición similar al gas de síntesis de la gasificación previamente explicado pero tiene aún más alquitranes y CH₄ por lo que es un gas contaminado, su resultado líquido es un combustible normalmente compuesto por hidrocarburos con alquitranes de cadenas largas y aceites incluidos fenoles y ceras que se condensaron cuando el proceso alcanza una temperatura ambiente, su composición sólida está conformada por material no combustible que haya sido o no totalmente transformada posee un contenido alto de carbono, metales pesados y componentes inertes (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico).

Se debe tener en cuenta que las partículas de biomasa o combustible que sea utilizado deben estar previamente estudiadas para conocer la temperatura exacta en la que reacciona (caracterización que se realiza en esta investigación para el polipropileno), también se

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

recomienda para esta prueba minimizar la exposición de las temperaturas bajas que logren aportar la formación de coque (Klug, 2012).

2.7 Materia objeto de investigación

La pandemia vivida durante los últimos años trajo consecuencias en todos los aspectos, las cuales hablando objetivamente en el sector industrializado afectaron en términos de producción sufriendo consecuencias económicas.

Consecuencias que a su vez generaron una alta demanda de la producción de elementos de protección y desinfección siendo el principal objeto el tapabocas, la Ong Oceans Asia reveló que la cifra de tapabocas liberados en el mar el año pasado durante la pandemia fue de 1.560 millones y que por consecuencia genero un aumento de la producción comercial y de su contaminación.

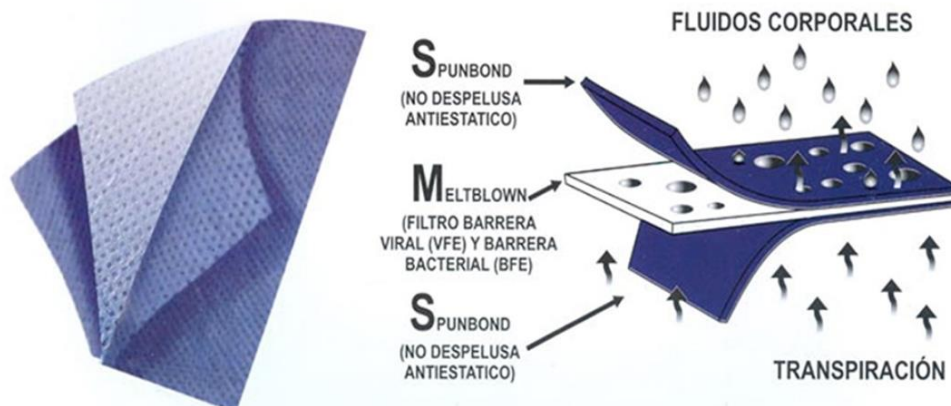
En busca de una solución a la contaminación y al impacto ambiental generado por el uso del tapabocas desechable se generaron diferentes alternativas, una de ellas y el objeto de nuestra investigación es el posible uso de los tapabocas (los cuales están compuestos por un tipo de tela denominada “no tejida” o SMS) como desecho para generar energía.

El tapabocas o mascara facial está compuesto por tres capas de “tela no tejida” la cual una de ellas actúa en forma de filtro teniendo una capacidad de filtración aproximada al 98% de partículas no oleosas, estas capas de polipropileno están compuestas por capas denominadas spundbond y meltdblown, por tanto, esta tela será nuestro objeto de investigación (la cual está compuesta 99% de polipropileno).

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Figura 8.

Distribución de las capas de un tapabocas



Nota. La imagen muestra el tapabocas antes de su manufactura en forma de tela no tejida y su composición de tres capas, la figura fue tomada de <https://biossmann.com/tela-no-tejida-de-polipropileno.html>

2.7.1 Estudio del polipropileno:

El polipropileno es un material que se desarrolló y se amplió en la industria hace muy poco tiempo y logro superar eficiencias establecidas en cierto tipo de productos que antiguamente se fabricaban bajo otro tipo de materiales y procesos.

Se considera un plástico duro y resistente con aguante a altas temperaturas (su cambio empieza por encima de los 150° C), poco denso y con alta flexibilidad, en el mercado actualmente es uno de los productos con mayor potencial por su facilidad económica.

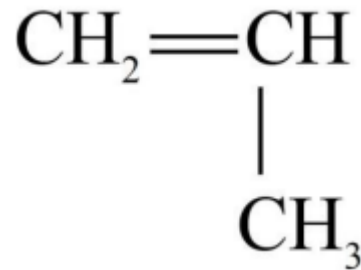
EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

La mayoría de polipropileno (C_3H_6)_n es obtenido mediante el uso de catalizadores por medio de la polimerización de propileno (C_3H_6), durante este proceso se llevan a cabo tres etapas compuestas por:

- La reacción de iniciación
- El encadenamiento de los monómeros
- La reacción de ruptura

Figura 9.

Cadena polimérica que compone el polipropileno



Nota. Se realizo la visualización de los enlaces de polipropileno con el fin de que sea más fácil la comprensión de su composición química

El polipropileno es un tipo de termoplástico que se empezó a usar aproximadamente en los años 50 a raíz de diferentes estudios, este plástico hace parte de las poliolefinas (materiales plásticos sintetizados a partir de hidrocarburos), en general se pueden encontrar tres tipos de diferentes de polipropileno: isostático, atactico y sindiotactico y estas van a depender directamente del grado de cristalización y distribución molecular.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

En cuanto a las propiedades y características este material se considera como un compuesto químicamente inerte (teniendo así una alta resistencia química), baja densidad y tiene una buena relación con su precio de producción. Aplicado a la manufactura sus principales procesos de producción son el termoformado, moldeo por inyección, soplado, extrusión y películas, los cuales son usados para la producción de fibras, recipientes botellas y demás elementos cotidianos, automoción, industria alimenticia y sanitaria.

Para el análisis térmico debemos tener en cuenta el comportamiento del propileno como nuestro objeto de estudio y cómo evoluciona sus propiedades bajo altas temperaturas, el polipropileno al ser un termoplástico es capaz de volverse flexible y deformable a altas temperaturas y cuando este se somete al cambio de las bajas temperaturas entra en algo que físicamente se considera un estado de transición vítrea (donde los cambios son solo físicos y no químicos).

El polipropileno es un combustible, que en diferentes condiciones normales de almacenamiento no puede presentar ningún riesgo de ignición. Ya que no es fácil de generar llama y su comportamiento tendería a deformar y derretir el material.

Durante este proyecto el material se verá sometido a calor y se evaluará su comportamiento frente al fuego y en diferentes condiciones, se realizará una prueba de combustión y diferentes análisis los cuales se presentan a continuación.

2.7.2 Polipropileno en forma de tela no tejida:

El proceso para la producción de PPNT es por medio del uso de una carda de textil y extrusoras, el alimentador de la maquina lo que hace es que almacena el polipropileno

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

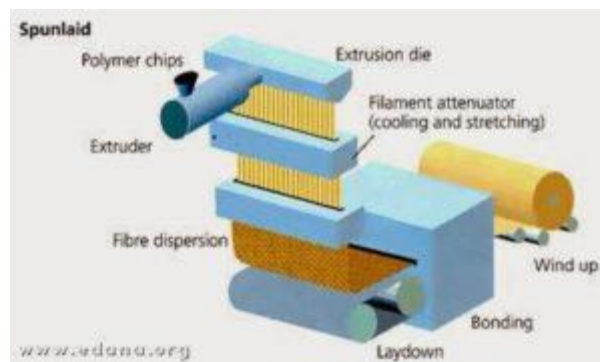
manufacturado en forma de ladrillo, el calor actúa a la extrusora y funde el ladrillo con el fin de llegar a la obtención de filamentos pasando a un proceso continuo.

Esos filamentos de polipropileno son repartidos por medios electrónicos en una banda donde de manera casi exacta se hace un tejido exacto como un matriz, luego llega a un rodillo enfriándose con una temperatura promedio de 100 grados centígrados, en ese rodillo se hace el grabado superficial para que las fibras se unan por fundición y la fibra adquiera las características aplicativas con el fin de filtrar.

Después de entender superficialmente el proceso de fabricación del PPNT cabe mencionar que las fibras con las cuales se fabrican se funden sobre los 110 grados, por ello que este PPNT es un material que no debe estar expuesto por encima de los 140 grados porque se funde completamente por su característica como termoplástico, esta tela es usada en artículos médicos (como lo es en nuestra investigación), agrícolas, industriales, higiénicos, para filtrar o para impermeabilizar. El PPNT que es fabricado bajo un proceso en específico con fibras continuas únicas por elementos mecánicas con calor aplicado se denomina spunbonded.

Figura 10.

Técnica de spunlaid para la manufactura de la tela no tejida



EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Nota. la imagen muestra la maquina en la cual se manufactura la tela spunbound que hace parte del tapabocas por medio de la técnica de Spunlaid, la figura fue tomada de <https://www.poljean.com/telas-no-tejidas>.

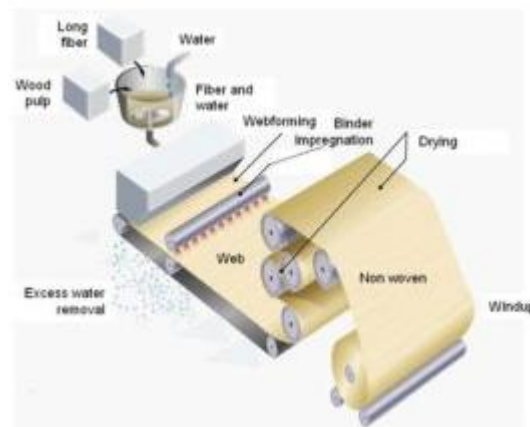
Esta Spunbonded está manufacturada bajo un proceso que funde el polipropileno y por presión de placa que forman el tejido y por convección de aire se gradúa el tamaño de los hilos que componen este tejido (el cual es el spun), las telas spunbonded son específicamente una combinación de propiedades entre un papel y un tejido. Este tipo de telas poseen una gran gama de productos característicos entre flexibles y bajos de peso hasta materiales con capas rígidas.

Otro proceso es el de termoformado de capas de PPNT tipo Meltblown, una tela compuesta por fibra también termoplástica de polipropileno, pero cambia en el proceso de obtención de esta ya que esta se extruye mediante una matriz lineal con varios orificios pequeños con el fin de llegar a construir filamentos bastante delgados y pequeños y estos luego son soplados en altas velocidades. Terminando así en un producto de un PPNT supremamente delgado lo cual también lleva que tenga una resistencia menor a el PPNT spunbonded, porque la resina y el material con el que está sometida la fundición debilita las cadenas poliméricas en todo el producto. Entre sus ventajas posee características de tela muy suave y una capacidad de filtrado y características antibacteriales supremamente altas.

Figura 11.

Técnica de obtención de la capa meltblown

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT



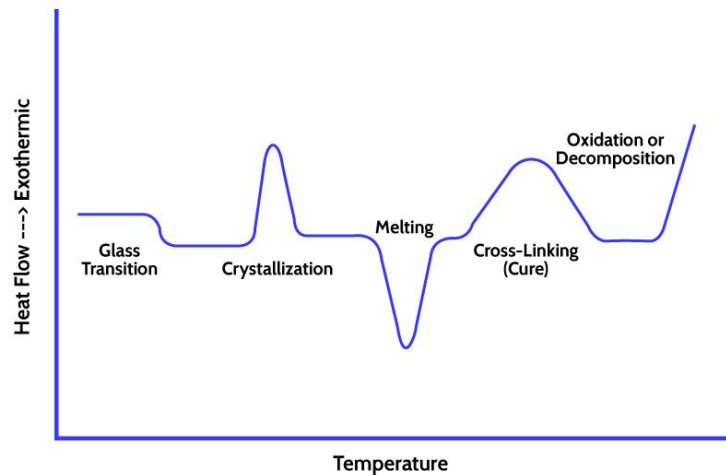
Nota. La imagen muestra la maquina que realiza el proceso de producción de la capa meltblown que hace parte de los tapabocas, la figura fue tomada de <https://www.poljean.com/telas-no-tejidas>.

2.8 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Es una técnica que se utiliza para determinar la presencia de cambios de entalpía que le ocurren a un material después de sufrir un cambio en sus propiedades tanto físicas como químicas. También determina dichas entalpías y la temperatura a la cuál ocurren los cambios, generalmente es utilizada para detectar reacciones potencialmente peligrosas que pueden ser causadas por productos químicos volátiles. Cuando el estudio es aplicado a polímeros los procesos endotérmicos encargados de incrementar la entalpía pueden ser la fusión, transición vítrea o vaporización, por otra parte, los procesos endotérmicos se encargan de disminuir la entalpía son la cristalización o la descomposición del material. Los polímeros presentan fases de transición que son los intervalos en los cuales se presenta un cambio de fase en un sistema producidos por una variación de la presión y/o temperatura lo cual genera un cambio de entalpía, las más comunes son presentadas a continuación:

Figura 12.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Transiciones térmicas medidas por DSC

Nota. la gráfica representa la estabilidad térmica según el flujo de calor y es presentada con el fin de facilitar su lectura en el tratamiento de datos según la etapa que este sufriendo el proceso, la figura fue tomada de <https://www.micromeritics.com/evaluacion-de-particulas/pruebas-analiticas/analisis-termico/?lang=es>.

En la prueba de DSC se aplica un gradiente de temperatura al material para determinar la respuesta que tiene fundamentada en su resistencia térmica. El comportamiento del material es influenciado principalmente por tres parámetros que son: la tasa de calentamiento, el tamaño de la muestra y la difusividad térmica del material. La prueba puede realizarse por dos metodologías de análisis que son:

2.8.1 DSC por flux de calor:

Se coloca en el mismo horno la muestra del material a estudiarse y una muestra de un material que sirva como referencia. Utilizando un controlador de temperaturas se aumentará o disminuirá su temperatura, durante este proceso se registran las temperaturas de las muestras y el flujo de calor que es entregado por el horno para las muestras, esto es posible por el tipo de material del que está compuesta la base del compartimiento en donde son colocadas las

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

muestras. Se realiza una diferencia entre las temperaturas del material estudiado y el material de referencia como se muestra en la ecuación 6 en donde T_M representa la temperatura del material estudiado y T_R :

$$\Delta T_{DSC} = T_M - T_R \quad (6)$$

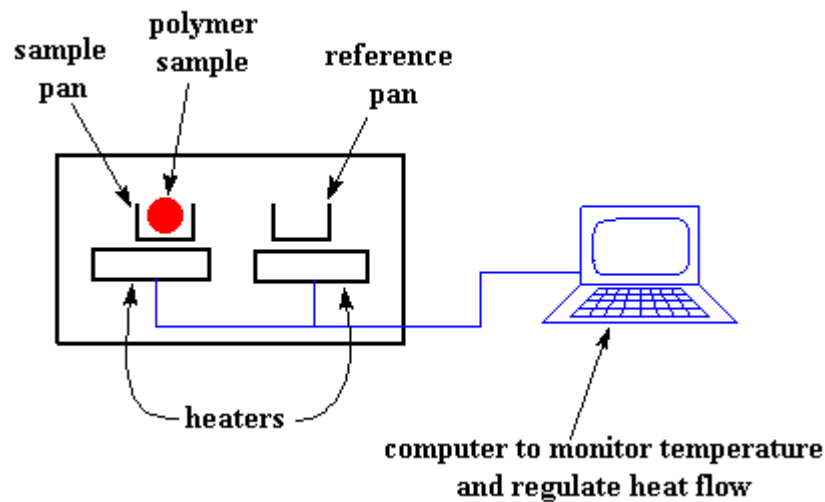
El flux de calor del material es calculado a partir del ΔT_{DSC} utilizando una equivalencia con la ley de Ohm, para ello es necesario tener en cuenta la resistencia térmica del material y del contenedor, la ecuación 7 presenta esta relación en donde R es la resistencia térmica del sistema.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_{DSC}}{R} \quad (7)$$

La principal ventaja de este método es su precisión al mostrar las regiones de transición del material, en la figura 13 se puede observar el esquema por flux de calor.

Figura 13.

DSC por flux de calor



Nota. la imagen muestra el equipo el cual es utilizado para la prueba de calorimetría de barrido por medio de flux de calor, la figura fue tomada de <https://pslc.ws/spanish/dsc.htm>.

2.8.2 DCS por compensación de energía:

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

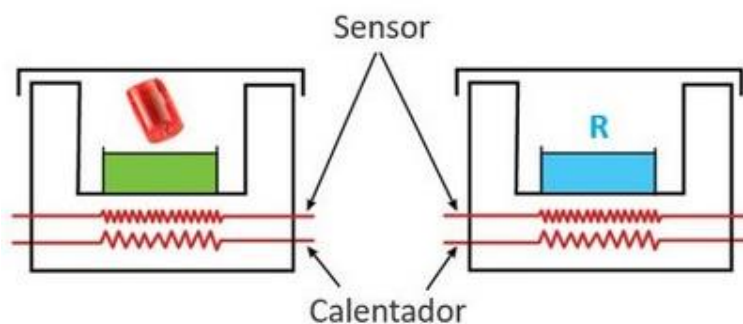
A diferencia del DCS por flux de calor en este tipo de método las muestras del material estudiado y el material de referencia se encuentran separadas en hornos independientes. Su funcionamiento se basa en determinar la diferencia de temperatura que ocurre entre los dos materiales debido a cualquier tipo de reacción endotérmica o exotérmica que le ocurra al material estudiado, por esto una cantidad de energía debe ser removida o aplicada del material de referencia para compensar la diferencia de temperatura de ambos materiales, dependiendo si la energía es aplicada o removida se determinan las fases de transición del material. En este procedimiento no se tiene en cuenta la temperatura sino la potencia térmica asociada a la transferencia de energía como se expresa a continuación:

$$\Delta P_{DSC} = P_R - P_M \quad (8)$$

En dónde P_R y P_M representan la potencia térmica de referencia y del material de estudio respectivamente. La principal ventaja de este método es que la medición de las reacciones de transición es fácil gracias a la rápida compensación del sistema. El esquema del DSC por compensación de energía es presentado a continuación:

Figura 14.

Esquema DSC por compensación de energía



EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Nota. La imagen muestra el funcionamiento de la prueba de calorimetría de barrido cuando se usa el sistema por compensación de energía, la figura fue tomada de <https://www.mexpolimeros.com/lab/dsc.html>.

2.8.3 Factores que influyen en el DSC

Al tratarse de una prueba con una sensibilidad muy alta hay que tener en cuenta varios factores que pueden interferir en la correcta medición de los parámetros, dichos factores son:

2.8.3.1 Preparación de la muestra. Hay que evitar que la muestra se contamine de cualquier componente pues las mediciones se pueden ver afectadas en las curvas, para su contención es necesario utilizar un dispositivo de alta precisión, generalmente se usa el cierre hermético.

2.8.3.2 Peso de la muestra. Cómo el equipo tiene una alta sensibilidad es necesario que para la prueba se utilicen muestras entre 5 y 20 mg con una tolerancia del 0,2% ya que la cantidad de material puede generar una diferencia de temperatura muy grande pues la energía liberada por los procesos de transición se ve aumentada también.

2.8.3.3 Material de referencia. Es importante conocer el material de referencia pues con él se hace la comparación del material estudiado, por lo que hay que conocer la respuesta térmica de referencia y sus propiedades.

2.8.3.4 Gas de purga. La purga para las celdas de DSC deber ser constante y el gas utilizado tiene que poseer una pureza alta demás de ser seco, generalmente se utilizan gases inertes, pero a veces es posible utilizar oxígeno o aire para presenciar el comportamiento del material de estudio a condiciones atmosféricas.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

2.8.3.5 Temperaturas de inicio y finalización. Antes de empezar con la prueba debe establecerse en la programación el rango de temperaturas. Es importante conocer características sobre el material estudiado pues si el intervalo de temperatura es muy pequeño puede ser que no se alcancen a visualizar algunos procesos de transición en el sistema.

2.8.3.6 Tasa de calentamiento. Es el parámetro más importante en la prueba de DSC, se mide en grados Celsius por minuto ($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$) y generalmente se utiliza un valor de $10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$. Su importancia radica en la velocidad y periodicidad con la que se pueden hacer las pruebas de DSC.

3. Método y materiales

En este capítulo se describe el material a utilizar para la investigación, su preparación para el proceso además de los métodos utilizados para determinar las propiedades físicas, químicas y térmicas de la materia prima.

3.1 Preparación de la materia de investigación

La tela no tejida de polipropileno (PPNT) fue la materia prima seleccionada para hacer la investigación y análisis en este trabajo (ver figura 15). Esta PPNT fue adquirida en un local de venta de elementos hospitalarios ubicado en la ciudad de Bucaramanga, Santander. Este material es la base para la fabricación de los tapabocas desechables que son de uso común a raíz de la pandemia coronavirus, su composición química es 99% polipropileno por lo que para hacer el tratamiento fue necesario adaptar la norma ASTM D3172-13 (2021) - *Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke* con la cual se decidió obtener muestras de

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

aproximadamente 1 gr para hacerles un proceso de secado utilizando un horno de mufla ubicado en el laboratorio de combustión de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, dicho proceso será descrito a continuación.

Figura 15.

Materia objeto de investigación



Nota. La imagen corresponde al rollo de tela comprado para la investigación, el cual se ve mas adelante cortado en diferentes muestras para sus respectivas pruebas

3.1.1 Secado de las muestras

Se tomaron tres muestras de PPNT y tres probetas de acrílico (ver figura 16) las cuales fueron pesadas para antes y después del proceso de secado. Las muestras fueron sometidas a una temperatura de 105°C durante 24 horas adaptando la norma ASTM D3173 - *Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke* usando un horno de mufla Terrígeno modelo D8 (ver figura 17).

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Figura 16.

Muestras para el secado



Nota. En la imagen se puede ver la forma en la que realizamos la disposición del material en las probetas de cristal antes de realizar la eliminación de la humedad.

El horno de mufla posee un controlador de temperatura que es el encargado de programar la temperatura necesaria SV (SET VALUE), dicha temperatura se mantendrá durante el tiempo programado en TS (TIME SET), es importante recalcar que la velocidad de calentamiento del horno es de 5°C/min por lo que hay que tener en cuenta el tiempo necesario TP (TIME PROGRAM) para que el horno alcance la temperatura del proceso, cuando el TS se cumple la resistencia se apaga por lo que la temperatura empieza a disminuir lentamente hasta que finalmente alcanza la temperatura ambiente.

Figura 17.

Horno de mufla

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

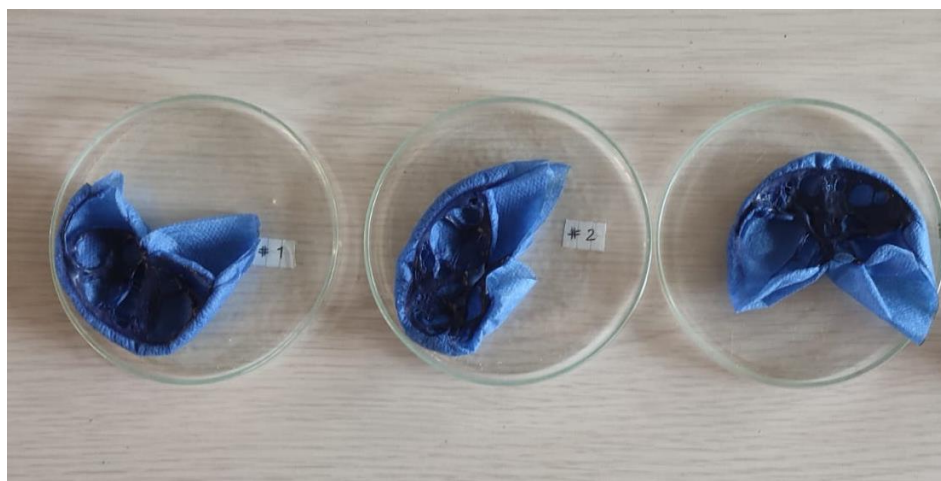


Nota. Se observa en la figura el horno de tipo mufla y su tablero digital en el cual fue realizada la prueba de humedad, volátiles y cenizas.

Al revisar las muestras después de 24 horas se evidencia que el material estaba carbonizando por la temperatura a la que fue sometido (ver figura 18), es por esto por lo que se decide hacer el proceso nuevamente a una temperatura de 75°C durante el mismo tiempo para obtener unos resultados precisos de la humedad del material.

Figura 18.

Muestras carbonizadas



EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Nota. en la imagen se observa las pruebas parcialmente carbonizadas debido a la temperatura de la norma y se presentan como contexto para la adaptación necesaria en la prueba de humedad.

Después de repetir el procedimiento con una temperatura menor se observa que las nuevas muestras no fueron carbonizadas con la temperatura escogida por lo que al terminar el tiempo de secado fueron pesadas en una balanza marca Pioneer, modelo PX244/E, Colombia, presentada en la figura 19.

Figura 19.

Balanza Pioneer PX244/E



Nota. En la imagen se observa la balanza calibrada que se encuentra en el laboratorio de combustión y en la cual se tomaron las masas antes y después de cada una de las pruebas.

Para calcular el contenido de humedad se tuvieron en cuenta las masas antes y después de las tres muestras, finalmente se determinó el porcentaje de humedad partiendo de la ecuación:

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

$$\%W = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{inicial}} * 100 \quad (9)$$

3.2 Prueba de volátiles y cenizas

Para realizar esta prueba se tomaron tres muestras de aproximadamente 2g que fueron depositadas en un crisol con la tapa puesta según la norma ASTM D3175-20 - *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke* realizando una adaptación debido a la fácil volatilización del material en estudio y fue registrada su masa antes del proceso, posteriormente fueron insertadas en el horno tipo mufla a una temperatura de 700°C durante 6 minutos, después de este proceso su masa fue registrada nuevamente para calcular el porcentaje de masa perdida mediante la ecuación 10 en donde m_{ti} es la masa inicial del recipiente con la muestra, m_{tf} es la masa final del recipiente con la muestra y m_{rec} es la masa del recipiente vacío.

$$\%VM = \frac{m_{ti} - m_{tf}}{m_{ti} - m_{rec}} * 100 \quad (10)$$

Posterior a la prueba de volátiles se realizó la prueba de cenizas según la norma ASTM D3174-12 (2018) - *Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. Para la prueba se utilizaron muestras de 1g que fueron depositadas en un crisol sin tapa e introducidas en el horno de mufla hasta que la temperatura alcanzó 500°C durante una hora aproximadamente. Después de ello el crisol fue extraído del horno y se registró su masa para determinar el porcentaje que quedaba de cenizas, finalmente el porcentaje de cenizas presente en la muestra fue calculado con la ecuación 11 en donde m_{cen} representa la masa del crisol con las cenizas, m_{rec} representa la masa del crisol vacío y m_m representa la masa de la muestra.

$$\%ASH = \frac{m_{cen} - m_{rec}}{m_m} * 100 \quad (11)$$

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

3.3 Carbono fijo

El porcentaje de carbono fijo es un valor calculado como el resultado de la sumatoria del porcentaje de humedad, materia volátil y cenizas restando del 100%, para este resultado todos los porcentajes deben estar en la misma base húmeda.

$$\%CF = 100 - \%W - \%VM - \%ASH \quad (12)$$

3.4 Poder calorífico

El proceso normalmente utilizado para calcular el poder calorífico de un material está basado en la norma ASTM D240-09 - *Standard Method of Test for Heat Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels Bomb Calorimeter*, sin embargo, debido a que el material utilizado en la investigación es un termoplástico de baja densidad y que en mediante las pruebas experimentales comprobamos que este plástico durante su degradación antes de alcanzar la volatilización se derrite generando un material líquido inflamable puede ocasionar daños en el equipo. Por esta razón el poder calorífico fue calculado mediante una correlación (Jigisha Parikh, 2004) para combustibles sólidos a partir de los resultados del porcentaje de carbono fijo (FC), material volátil (VM) y cenizas (ASH).

$$PCS = 0,3536FC + 0,1559VM - 0,0078ASH \quad (13)$$

Esta correlación presenta un porcentaje de error absoluto de 3,74% y un error sistemático del 0,12% para la respectiva medición del poder calorífico superior. Con el valor del PCS podemos utilizar la ecuación 14:

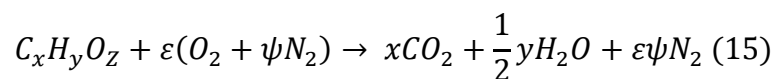
EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

$$PCI = PCS - h_g * \left(\frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right) \quad (14)$$

Siendo PCI el poder calorífico inferior del material ($\frac{MJ}{Kg}$); H y M son el hidrógeno y porcentaje de humedad respectivamente y h_g es el calor latente de vaporización en las mismas unidades que PCS, es decir, $2260 \frac{KJ}{Kg}$ (MONIR *et al.*, 2018, como se citó en Méndez & Ramírez, 2020)

3.5 Modelo teórico de temperatura de llama adiabática

Se plantea la necesidad de un modelo teórico con el fin de poder dar una visión comparativa de los valores experimentales generando resultados que puedan evaluarse de manera precisa, sumado a eso, se investigó previamente el material y su comportamiento a diferentes temperaturas para poder contextualizar la prueba de combustión y poder plantear teóricamente un modelo que nos permita tener una visión previa de los posibles resultados a esperar. Para esta prueba se plantea la ecuación teórica de combustión:

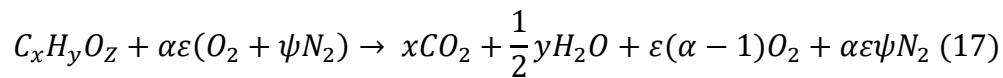


En donde la constante ε representa el número de moles de oxígeno teórico por mol de combustible y se calcula con la ecuación:

$$\varepsilon = x + \frac{1}{4}y - \frac{1}{2}z \quad (16)$$

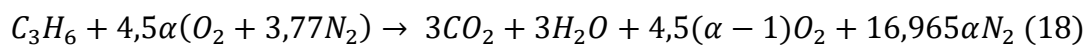
EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Los valores de x , y , z representan el número de átomos de carbono, hidrogeno y oxigeno respectivamente presentes en el combustible del proceso. También es utilizado el coeficiente $\psi = 3,77$ para oxidación con aire, para los procesos de la vida real no es posible utilizar una ecuación de combustión perfecta en la cual exista combustión completa por lo que se asume que hay exceso de aire con lo cual la ecuación utilizada es:



En dónde α representa el porcentaje de aire en exceso, para nuestro caso el polipropileno tiene como formula química C_3H_6 por lo que calculando el valor de ε y reemplazándolo en la ecuación 17 finalmente obtenemos la ecuación 18:

$$\varepsilon = 3 + \frac{1}{4} * 6 - \frac{1}{2} * 0 = 3 + \frac{3}{2} = \frac{9}{2} = 4,5$$



Note que en la ecuación 18 aún se encuentra expresado la constante α , esto se debe a que el porcentaje de exceso de aire variará con el fin de estudiar el comportamiento de la temperatura de llama adiabática. Con los coeficientes obtenidos en la ecuación de reacción podemos estudiar el proceso como un sistema de flujo estacionario en dónde la relación de balance de energía puede expresarse de la siguiente manera:

$$Q - W = H_{prod} - H_{reac} \quad (19)$$

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Donde:

$$H_{prod} = \sum N_p (\overline{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p$$

$$H_{reac} = \sum N_r (\overline{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r$$

En dónde N_p y N_r representan la cantidad de moles de cada compuesto en los productos y los reactivos respectivamente y \overline{h}_f° representa la entalpia sensible de formación en estado de referencia estándar, \bar{h} representa la entalpia sensible en el estado actual del compuesto y \bar{h}° representa la entalpia sensible en estado de referencia.

Generalmente en los procesos de combustión de flujo estacionario no utilizan el término del trabajo pues no hay ninguna interacción de este tipo, además, en una cámara de combustión el calor sale del proceso, no hay una entrada de este, es por esto por lo que la relación de balance de energía queda:

$$Q_{salida} = \sum N_r (\overline{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r - \sum N_p (\overline{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p \quad (20)$$

Si todo el calor producido en el proceso en vez de salir hacia los alrededores pudiera ser utilizado internamente para seguir aumentando la temperatura de los productos diríamos que el calor de salida es nulo por lo que se alcanzaría un valor máximo que es conocido como la **temperatura de llama adiabática**, esta temperatura es necesaria para saber qué resultados esperar al momento de hacer la prueba de combustión. Si reemplazamos $Q = 0$ en la ecuación 20, obtenemos:

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

$$H_{prod} = H_{reac} \rightarrow \sum N_p (\overline{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p = \sum N_r (\overline{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r \quad (21)$$

Los cálculos correspondientes a la entalpía de los reactivos fue un proceso sencillo pues sus estados iniciales son conocidos, sin embargo, la temperatura de los productos no es conocida por lo que se no fue posible precisar sus estados de una manera directa, es por esto por lo que se empleó una técnica iterativa en la cual se supuso una temperatura para los gases producto, con esta temperatura se determinó el valor de H_{prod} y se verificó que fuera igual al valor de H_{reac} , después de encontrar la temperatura de llama adiabática teórica se dio inicio a la prueba en el quemador en dónde se realizó el estudio del comportamiento de la temperatura del material variando la cantidad de aire a la entrada.

3.6 Relación aire – combustible

La prueba de combustión en la caldera se realizó en el laboratorio de combustión de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, utilizando un horno de biomasa fabricado por Industrias Acuña LTDA mostrado en la figura 20.

Figura 20.

Horno de biomasa (Industrias Acuña LTDA)

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT



Nota. Se puede observar en la figura el horno de biomasa el cual dispuso la escuela de ingeniería mecánica con el fin de realizar la prueba de combustión y la prueba de emisiones.

Para dar inicio al proceso fue necesario purgar el sistema para limpiarlo de las posibles impurezas en su interior, se verificaron que los manómetros estuvieran en 0 psi y que las válvulas de transporte estuvieran abiertas, posteriormente fue llenado el tanque de alimentación de la caldera con agua hasta su nivel máximo. Al tener el sistema listo se energizó para poder accionar el breaker principal y quitar el seguro del tablero de control, con esto, se encendió la bomba de alimentación la cual alimentó la caldera, seguido a ello se cargó el interior de la cámara de combustión inicialmente con una muestra de 30g de PPNT, luego fue abierto el piloto de la entrada de gas que en conjunto con la chispa de un encendedor iniciaron la combustión. La muestra fue dejada cinco minutos con la apertura máxima de la compuerta de control de flujo de aire en donde se registró la temperatura cada 30 segundos, también la temperatura máxima alcanzada y el tiempo que tardó en alcanzar dicha temperatura. Esta prueba se repitió variando la masa de la muestra a 45g y 60g, también para cada una de las muestras se hizo la prueba con la apertura mínima de la compuerta de control de flujo de aire.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Para calcular la relación aire combustible fue necesario obtener la cantidad de aire que ingresó a la cámara de combustión durante el tiempo de la prueba, para ello se hizo uso de un anemómetro térmico ref. WK026 (ver figura 21) con el que fue medida la velocidad de entrada del aire cuando la compuerta estaba en su apertura mínima y máxima, los valores fueron de $3,5 \frac{m}{s}$ y $5 \frac{m}{s}$ respectivamente, después de ello y con la medida del diámetro del tubo de entrada se procedió a calcular el caudal que estaba ingresando, el proceso para la apertura mínima de la compuerta de aire fue el siguiente:

$$Q = V * A \rightarrow \left(3,5 \frac{m}{s}\right) * \left(\frac{\pi}{4}\right) * (0,043 m)^2 = 5,0827 * 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

Haciendo la conversión de unidades a $\frac{L}{s}$ obtenemos:

$$5,0827 * 10^{-3} \frac{m^3}{s} * \frac{1000 L}{1 m^3} = 5,0827 \frac{L}{s}$$

Multiplicamos por la cantidad de tiempo que se hizo la prueba, en este caso cinco minutos que equivalen a 300 segundos:

$$5,0827 \frac{L}{s} * 300 s = 1524,81 L$$

Ahora utilizando la ecuación del gas ideal y con presión de 1 atm, volumen 1524,81 litros, temperatura medida el día de la prueba de $24^{\circ}C \rightarrow 297,15K$ y constante de los gases $R =$

$0,08206 \frac{atm * L}{mol * K}$ procedemos a calcular el número de moles de aire:

$$n = \frac{P * V}{R * T} \rightarrow n = \frac{(1 atm) * (1524,81 L)}{\left(0,08206 \frac{atm * L}{mol * K}\right) * (297,15 K)} = 62,533 mol de aire$$

Después de obtener el número de moles calculamos la masa total del aire utilizando la relación entre la masa (m_{aire}) y el peso molecular (M_{aire}):

$$n = \frac{m_{aire}}{M_{aire}} \rightarrow n * M_{aire} = m_{aire} \rightarrow 62,533 mol * 28,96 \frac{g}{mol} = 1810,9556 g de aire$$

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Este mismo procedimiento fue realizado para el cálculo de la masa de aire cuando la apertura de la compuerta de aire estaba al máximo y el valor obtenido fue de 2587,075 g de aire.

Figura 21.

Anemómetro térmico WK026



Nota. se observa en la imagen el anemómetro con el cual se midió la cantidad de aire entrante en el horno de biomasa presentado en la figura 20.

3.7 Análisis de las emisiones por medio de la combustión de PPNT

Para realizar el análisis de las emisiones debemos tener en cuenta toda la sección 2.5 la cual se encarga de explicar cuáles son las emisiones encontradas comúnmente al evaluar un proceso de combustión, como se explicó previamente el equipo en el cual se realizó dicho proceso termodinámico fue un calderín que se encuentra en el laboratorio de combustión de la escuela de ingeniería mecánica en donde se propuso desarrollar esta prueba de emisiones tomando resultados de 10 minutos y definiendo unas etapas de descomposición del material que se evidenciaran en los resultados, para ellos se requirió de un equipo de medición portátil con el fin de la facilidad en el equipo de poder captar todas las emisiones teniendo en cuenta el espacio que disponíamos en el laboratorio, el equipo del cual se hizo uso es de la empresa alemana Testo

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

en el cual hicimos su modelo es TESTO 350 con especificaciones técnicas en el *anexo C* el cual cuenta con una sonda estándar para muestreo de gas (modular) con un cono de sujeción y un filtro de suciedad para el modelo el cual se evidencia en los anexos.

Figura 22.

Caja de análisis de gases modelo TESTO 350



Nota. En la imagen se puede observar el analizador de gases industriales marca Testo referencia 350 con el cual se realizó la caracterización de las emisiones producto de la quema del PPNT.

Figura 23.

Sonda modular incorporada para cálculo de las emisiones

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT



Nota. Se observa en la imagen la sonda que parcialmente fue introducida en el escape del horno de biomasa y que hace parte de la conexión del equipo Testo 350.

Para esta prueba se definieron unos porcentajes límites de oxígeno y dióxido de carbono con el fin de que los sensores que tiene el equipo no causen la detención de la prueba y se tomó como referencia el límite porcentual más alto debido a que los estudios previos a diferentes tipos de material de polipropileno arrojan que en cantidades más densificadas el PP no era mayor al 25% de dióxido de carbono y 5% de oxígeno en sus emisiones.

Después de definir los parámetros necesarios para la ejecución y conociendo el comportamiento térmico del material según el estudio de la temperatura y su relación aire combustible, se realizó el análisis de emisiones para tres muestras diferentes igual que el análisis de combustión (30g, 45g y 60g) en donde con el fin de poder realizar una evaluación más exacta en cuanto a cantidad de emisiones se estudiaran los resultados de las mediciones de la prueba de 60 gramos la cual corresponde a la prueba con mayor cantidad de muestra en donde es la muestra de capacidad máxima (debido a que el material de difícil densificación no presenta la posibilidad de cargar el Calderín con mayor cantidad de combustible) del calderín presentado en la figura 20 teniendo en cuenta su apertura máxima y mínima de aire con el fin de poder

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

comparar como afecta esta apertura a la cantidad emitida , comparando los resultados obtenidos en dos condiciones, con apertura máxima y apertura mínima para poder cuantificar la influencia de la cantidad de aire que le entra por medio de la relación aire/combustible.

Con la finalidad de que las conclusiones en la prueba de emisiones sean con el enfoque ambiental adecuado se realizó una investigación de la norma vigente de emisiones aplicada en Colombia la cual está regida bajo la resolución No. 2254 del 01 de Nov de 2017 por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

Figura 24.

Niveles máximo-permisibles de contaminantes criterio aire

Contaminante	Nivel máximo Permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	50	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas
CO	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

Nota. esta imagen corresponde a las emisiones permitidas en Colombia para procesos de quema directa de material y fue tomada de la resolución No. 2254 del 01 de Nov de 2017 del Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

Se debe tener en cuenta que los datos presentados en esta prueba tienen un nivel de confianza del equipo el cual posee un valor del 95 % en donde los datos finales en cuanto a componentes presentes en el gas serán en correspondencia del equipo utilizado que posee unas

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

tolerancias y especificaciones (ver anexo C), ya que existen otras tecnologías las cuales tienen la posibilidad de mostrar otra formación de compuestos en las emisiones y diferentes metales pesados.

3.8 Análisis termogravimétrico (TGA)

El proceso planteado inicialmente para calcular la estabilidad térmica del material es el análisis termogravimétrico (TGA) sin embargo, para utilizar este método se necesitaba situar una cantidad de $6\mu\text{g}$ en el crisol del analizador termogravimétrico, para conseguir esta cantidad el tamaño de la muestra excedía el volumen del crisol por lo que no fue posible de realizar la prueba. Por esta razón se optó por realizar una Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) que también nos permite identificar los cambios ocurridos al material en función de la temperatura. La prueba fue realizada en la escuela de Ingeniería Química utilizando un calorímetro diferencial TA-INSTRUMENT-MOD-Q-10 mostrado en la figura 25.

Figura 25.

Calorímetro diferencial



EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Nota. En la figura se observa el equipo en el cual se realizó la prueba de calorimetría de barrido del PPNT, este equipo se encuentra en el laboratorio de biomasa de la escuela de ingeniería química de la UIS.

La prueba fue realizada siguiendo la norma ASTM E537-20 *Standard Test Method for Thermal Stability of Chemicals by Differential Scanning Calorimetry*. Para la prueba se utilizó una muestra de 3,3mg de PPNT, el método utilizado fue DSC por flux de calor con una tasa de calentamiento de $10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ y un intervalo de temperaturas de 10°C hasta 455 °C, la atmosfera en la que se realizó la prueba fue aire a temperatura ambiente.

3.9 Potencial energético

“La cantidad de energía recuperada de los residuos basándose en diferentes métodos de conversión es una relación entre el valor del poder calorífico y el contenido orgánico” (Tsunatu *et al.*, 2015, como se citó en Aderoju *et al.*, 2019).

En este contexto, los residuos plásticos son considerados como el combustible utilizado para la combustión en plantas de aprovechamiento energético de residuos, y con el poder calorífico inferior (PCI) para la generación de energía eléctrica. Por lo tanto, el Potencial de Recuperación de Energía (Pre) como es expresado en la ecuación 22 es simplemente la cantidad de energía que puede producir suministro de energía eléctrica o un sistema de calefacción durante una hora. Sin embargo, el potencial de generación de energía es la cantidad de energía que puede producir energía eléctrica o un sistema de calefacción por 24 horas, y es expresado en la ecuación 22 cómo (Aderoju *et al.*, 2019):

$$Pre (kWh) = PCI * W * \left(\frac{1000}{860}\right) * \beta \quad (22)$$

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Dónde Pre (kWh) = potencial de energía recuperada de los desechos plásticos; PCI = poder calorífico inferior; W =peso de los plásticos (toneladas); β =Eficiencia de conversión que está entre 22% - 28% (IEA, 2007).

El potencial de generación de energía (PGE) se calcula según la ecuación 23; este se amplió aún más en la ecuación 24:

$$PGE (kW) = \frac{Pre}{24} \quad (23)$$

$$PGE = PCI * Wt * 0,04845 * \beta \quad (24)$$

En 2020, el procesamiento nacional de resinas plásticas registró una cifra de 1,33 millones en 2020. Los materiales más demandados en ese año para la fabricación de distintos productos de plástico fueron los polietilenos (39%), los polímeros de propileno (19,5%), los policloruros de vinilo (16%), las resinas de poli(etilentereftalato) PET (12,5%) y los poliestirenos (6%), y otros polímeros (8%) (Gutiérrez, 2021). Se estima que en el mundo se ha logrado reciclar el 9% del plástico producido, se ha incinerado el 12% y el 79% se encuentra en los botaderos y en el ambiente (Rodríguez, 2022).

Como el PCI debe ser expresado en unidades de $\frac{Kcal}{kg}$ se hace la conversión de $\frac{MJ}{kg}$ a $\frac{Kcal}{kg}$ multiplicando el valor del PCI por 238,85. Con estas cifras será determinado el potencial de energía recuperado de los desechos plásticos.

4. Resultados y discusión

En esta sección del libro serán presentados los datos obtenidos concorde fueron presentados en la sección anterior en dónde fueron explicados los métodos utilizados en cada una de las pruebas.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

4.1 Secado de las muestras

La tabla 1 presenta los datos del peso antes y después del secado de cada una de las tres muestras, así como la variación entre dichos pesos que es calculada mediante la diferencia entre ambos, a partir de este análisis se obtuvo un valor promedio de humedad $16,8 * 10^{-3}\%$.

Tabla 1.

Análisis del porcentaje de humedad

Prueba de humedad				
N° de muestra	Peso antes (g)	Peso después (g)	Variación (g)	Humedad (%)
1	46,1662	46,1590	0,0072	0,0156
2	44,1815	44,1740	0,0075	0,0170
3	43,4840	43,4762	0,0078	0,0179
Promedio	44,6106	44,6031	0,0075	0,0168

Nota. esta tabla muestra los resultados finales de la prueba de humedad del PPNT en estudio.

4.2 Prueba de volátiles y cenizas

En la tabla 2 se tabularon los datos de las tres muestras utilizadas para la prueba de volátiles a 700°C ya que se realizó una adaptación de la norma que propone utilizar para esta prueba la mufla a 925°C debido a que por prueba error se comprobó que este tipo de plástico volatiliza muy rápido a una temperatura superior a los 500 °C , los datos presentados son la masa inicial de la muestra, la masa total del recipiente con la muestra antes del proceso, la masa total después de la prueba, la masa final de la muestra y el porcentaje de volátiles obtenido. En promedio la materia volátil de la PPNT fue de 99,66%.

Tabla 2.

Prueba de volátiles

Prueba de volátiles 700°C

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

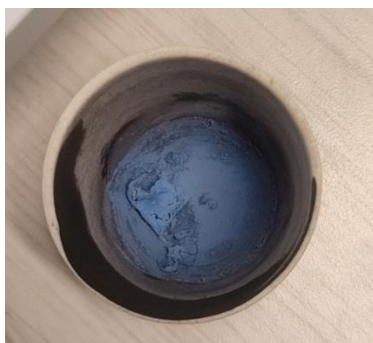
N° de muestra	Masa inicial de la muestra (g)	Masa total inicial (g)	Masa total final (g)	Masa final de la muestra (g)	Cantidad de volátiles (%)
1	2,4588	38,8742	36,4241	0,0087	99,6462
2	2,3148	41,8542	39,5481	0,0087	99,6242
3	2,4457	39,0471	36,6085	0,0071	99,7097
Promedio	2,4064	39,9252	37,5269	0,0082	99,6600

Nota. Esta tabla muestra los resultados de la prueba de volátiles final del PPNT en estudio.

Después de realizar la prueba de materia volátil el siguiente proceso fue la cantidad de cenizas, para ello se realizó el procedimiento explicado en la sección 3.2, para este caso solo tuvimos que dejar la muestra durante una hora pues al revisarla al cabo de ese tiempo notamos que su residuo era muy poco (ver figura 26) y si se dejaba más tiempo no iba a quedar ninguna clase de cenizas.

Figura 26.

Prueba de cenizas



Nota. En la imagen se observa el crisol utilizado para la prueba de cenizas después de terminada esta prueba y se permite visualizar el material restante del PPNT dispuesto en el fondo de este.

Si se observa con atención la figura 26 por el color que tiene el crisol puede llegar a dar la impresión de que está con una gran cantidad de cenizas del material, sin embargo, esto no es así

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

ya que después de hacer las pruebas cambiaba el color del crisol, quedando del mismo color de la tela, finalmente después de hacer por triplicado el proceso con muestras de diferentes pesos se obtuvo un valor promedio de 0,3066% de contenido de cenizas.

Tabla 3.

Resultados prueba de cenizas

Porcentaje de cenizas 1	Porcentaje de cenizas 2	Porcentaje de cenizas 3	Promedio
0,3018	0,3278	0,2903	0,3066

Nota. Esta tabla presenta los resultados de la prueba de cenizas los cuales fueron tomados 3 veces y su respectivo promedio.

4.3 Carbono fijo

El porcentaje de carbono fijo fue calculado utilizando los valores promedio del porcentaje de humedad, porcentaje de volátiles y porcentaje de cenizas en la ecuación 12 obteniendo un valor de 0,0166% de carbono fijo.

4.4 Poder calorífico

Mediante el uso de la correlación presentada en la sección 3.4 y utilizando los valores obtenidos de carbono fijo, materia volátiles y cenizas se calculó el poder calorífico superior del material obteniendo un valor de $15,5405 \frac{MJ}{kg}$, teniendo en cuenta que el porcentaje de error de la correlación se obtiene que el valor mínimo del poder calorífico superior es de $14,9592 \frac{MJ}{kg}$ y su valor máximo es de $16,1216 \frac{MJ}{kg}$.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Después de obtener el PCS se hizo uso de la ecuación 14, para realizar este proceso fue necesario encontrar la cantidad de hidrógeno presente en el material, según Shemwell & Levendis, 2011, el porcentaje de hidrógeno presente en el polipropileno es del 14%, este valor fue utilizado obteniendo un valor de $12,6925 \frac{MJ}{kg}$ y teniendo en cuenta el porcentaje de error del PCS el valor del PCI mínimo y máximo es de $12,1112 \frac{MJ}{kg}$ y $13,2736 \frac{MJ}{kg}$ respectivamente.

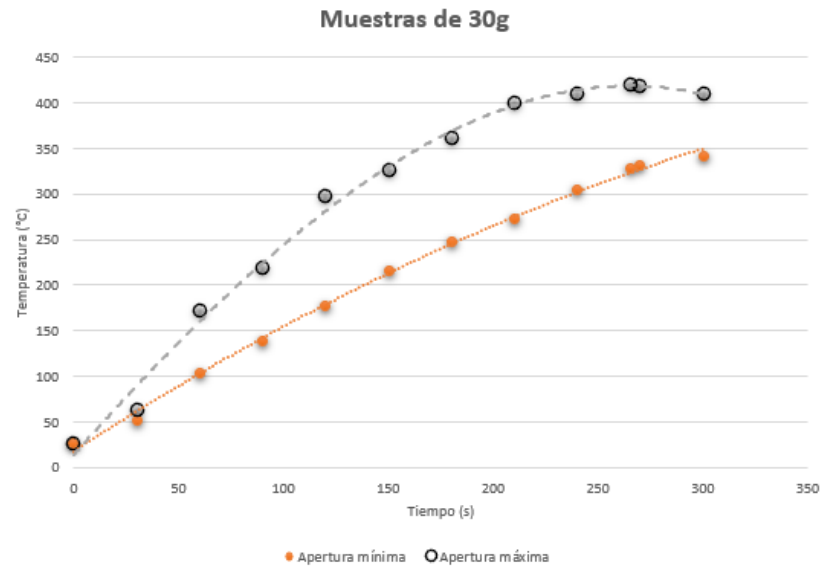
4.5 Temperatura de llama para PPNT y relación aire combustible

Con el fin de determinar y analizar las variables de mayor incidencia en la combustión del material de estudio se presentan los resultados de la prueba de la combustión bajo triplicada considerando como principales variables de estudio la cantidad de combustible y cantidad de aire en la cámara de combustión, todo esto en un tiempo fijo de 300 segundos (5 minutos). Con las temperaturas registradas cada 30 segundos fueron graficados los datos variando la apertura de la compuerta de entrada de aire en el quemador como se puede observar en la figura 27, 28 y 29, para cada una de las muestras (30g, 45g y 60g) se comparó el comportamiento que tenía la temperatura cuando se tenía una apertura máxima de entrada de aire contra la apertura mínima de entrada de aire, los resultados se presentan a continuación:

Figura 27.

Prueba utilizando 30 gramos de muestra

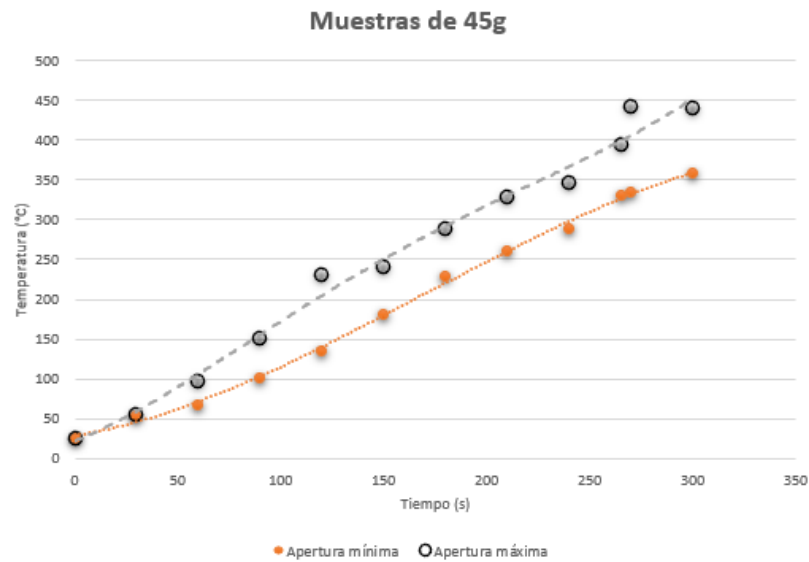
EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT



Nota. El grafico representa el comportamiento de la temperatura con apertura mínima y máxima para la prueba de combustión con 30 gramos de muestra.

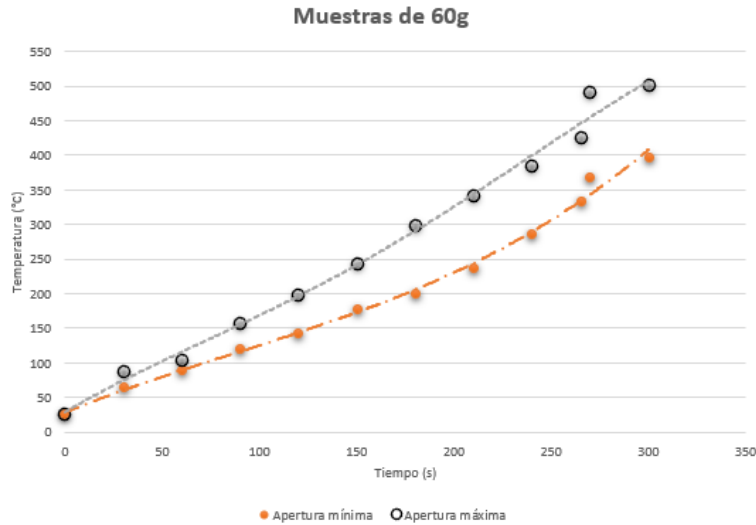
Figura 28.

Prueba utilizando 45 gramos de muestra



Nota. El grafico representa el comportamiento de la temperatura con apertura mínima y máxima para la prueba de combustión con 45 gramos de muestra.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Figura 29.*Prueba utilizando 60 gramos de muestra*

Nota. El gráfico representa el comportamiento de la temperatura con apertura mínima y máxima para la prueba de combustión con 60 gramos de muestra.

Para poder analizar los resultados obtenidos es necesario presentar los resultados de la relación entre el aire y el combustible, según lo presentado en el apartado 3.6 la cantidad de aire presente dentro de la cámara de combustión con la apertura mínima y máxima fue de 1810,9956 g y 2587,075 g respectivamente, con estos resultados se calculó también el porcentaje de aire en exceso, los valores son presentados en la tabla 4.

Tabla 4.*Relación A-C y exceso de aire*

Muestra de 30g	Muestra de 45g	Muestra de 60g
----------------	----------------	----------------

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

	Apertura mínima	Apertura máxima	Apertura mínima	Apertura máxima	Apertura mínima	Apertura máxima
A-C	60,36	86,23	40,24	57,49	30,18	43,12
Exceso (α)	4,07	5,81	2,71	3,87	2,03	2,91

Nota. Esta tabla muestra los resultados de la relación aire-combustible determinada experimentalmente para la muestra de 30,45 y 60 gramos respectivamente con su tipo de apertura y exceso.

Mediante los valores presentados en la tabla anterior se evidencia que los valores de la relación A-C son muy altos, esto se debe principalmente a que las muestras seleccionadas para la prueba tienen una cantidad de masa muy pequeña comparada con la cantidad de aire que ingresa a la cámara de combustión, este factor no fue hecho a propósito puesto que el volumen al interior de la cámara es muy pequeño y el PPNT tiene una densidad tan baja que lograr una cantidad mayor de masa requeriría un mayor espacio, es por esto por lo que se optó por que la cantidad máxima de muestra fuera de 60g.

Con los resultados presentados anteriormente podemos notar que todos los comportamientos en las figuras 27, 28 y 29 son similares pues con el pasar del tiempo la cantidad de aire dentro de la cámara de combustión aumentaba, este aumento produce que la llama que estaba encendida se alimente constantemente de oxígeno por lo que facilita el proceso de combustión, sin embargo estas temperaturas difieren mucho de las temperaturas de llama adiabática que fueron calculadas mediante el procedimiento explicado en el apartado 3.5 del presente texto, estas temperaturas y su comparación con las alcanzadas en la práctica son:

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Tabla 5.*Temperaturas teóricas vs experimentales*

Masa (g)	Teórico		Experimental		Eficiencia	
	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Tmin (%)	Tmax (%)
30	711	525	342	420	48,1	80,0
45	1005	743	359	433	35,7	58,3
60	1277	863	397	501	31,1	58,1

Nota. Esta tabla muestra la comparación de la temperatura teórica del modelo vs la temperatura obtenida en el proceso experimental con el fin de poder calcular la eficiencia a cada una de las muestras la cual fue tomada 3 veces por prueba.

En la tabla 5 Tmin y Tmax representan la temperatura de llama cuando se tiene la apertura mínima y máxima de la compuerta del aire respectivamente. Según la termodinámica para que un proceso alcance su temperatura de llama máxima es necesario que el exceso de aire sea el menor posible, sin embargo, de acuerdo con la tabla 4 para nuestro caso de estudio el exceso de aire fue significativamente grande en comparación con la cantidad de masa de las muestras, es por esto por lo que las temperaturas experimentales para la apertura mínima no alcanzaron más del 49% de su temperatura teórica, además podemos notar que la temperatura alcanzada cuando la apertura estaba al máximo fue mayor siendo esto una contradicción a lo anteriormente mencionado pues a mayor apertura, mayor exceso de aire por lo que la temperatura teóricamente debería disminuir, esto puede ser explicado gracias al comportamiento del PPNT ya que durante las pruebas realizadas se determinó que el material al quemarse se convierte en un líquido inflamable que puede durar encendido tanto tiempo como sea alimentado de aire que a su

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

vez alimenta la llama producida por el material. Este fenómeno no está concebido dentro del proceso teórico del cálculo de temperatura de llama ni tampoco las reacciones químicas internas que puedan ocurrir durante este cambio de fase, también es importante recalcar que el quemador utilizado para la prueba tiene pérdidas de calor y que sumado a que el proceso se llevó a cabo a presión constante en dónde parte de la energía generada en el proceso de combustión se utiliza en cambiar el volumen de control del sistema se estima que las pérdidas totales alcancen valores significativos que finalmente se ven reflejados en la temperatura máxima alcanzada.

4.6 Resultados de las emisiones por medio de la combustión de PPNT

Con objetivo de presentar resultados que sean prácticos y fáciles en materia de estudio se realiza la cuantificación por medio de graficas las cuales sean comparables, se muestran las medidas conseguidas en la prueba de combustión realizada en el Calderín, los resultados fueron obtenidos bajo el uso del software Testo Easy-Emission versión 2.9 utilizando la herramienta de medición en línea. Para el planteamiento de conclusiones de este estudio se utiliza la resolución de la figura 24 del apartado 3.7 y la teoría de gases de emisión en combustión del apartado 2.5.

Se realizo una medición total de 10 minutos (600 segundos) en donde se consideró este tiempo de emisión debido a que es el tiempo que corresponde a la degradación semicompleta del combustible PPNT y donde se puede evidenciar la tendencia completa de los gases emitidos.

Se debe considerar para estos resultados que las pruebas fueron realizadas bajo corrientes de aire que hacen parte del ambiente del laboratorio de combustión de ingeniería mecánica el cual se encuentra en un tercer piso y con el fin de no contaminar con la combustión del plástico todo el espacio se ubicó el ducto de escape del Calderín por el cual fue introducida la sonda modular de captación en un saliente al ambiente más cercano a su posible configuración espacial

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

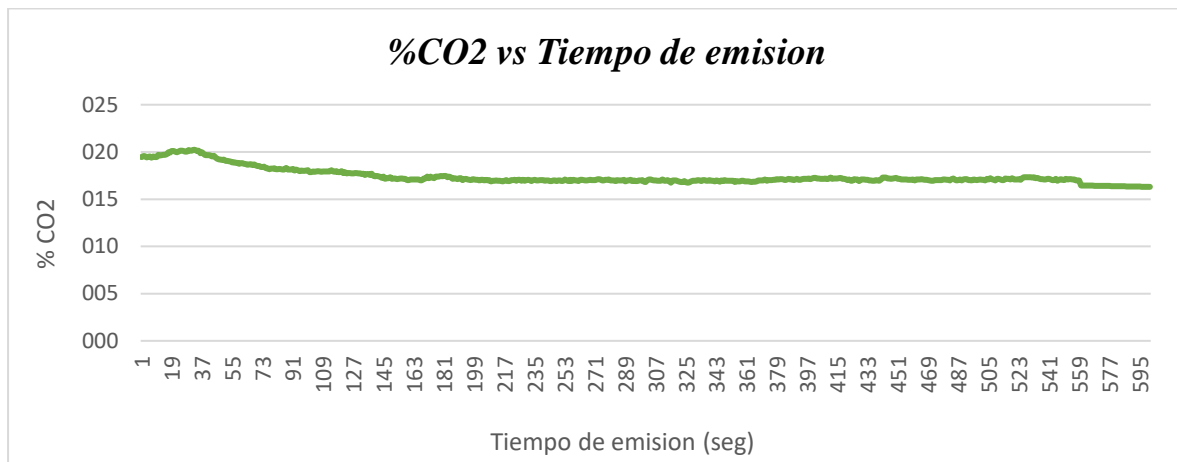
permitiendo que dichas corrientes de aire pudieran afectar levemente la medición exacta de esta prueba.

Resultados de la medición de emisiones para la muestra de 60 gramos:

- CO₂:

Figura 30.

Emisión del %CO₂ presente durante la prueba de combustión con apertura máxima de la compuerta de aire de combustión

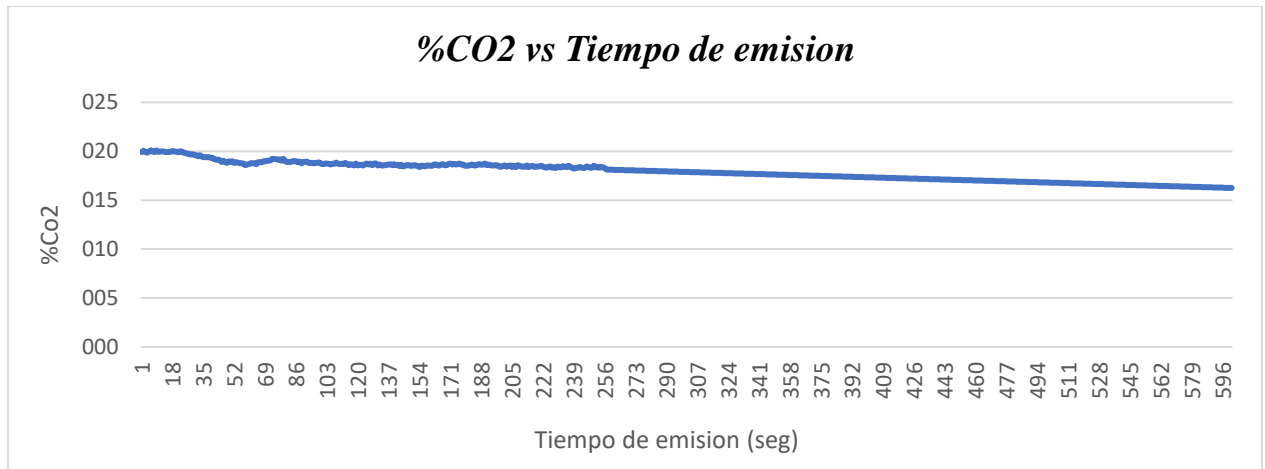


Nota. Este grafico representa la disminuci3n del % de CO₂ presente en los gases finales emitidos con apertura m3xima a medida que aumento el tiempo de duraci3n de la prueba de emisiones.

Figura 31.

Emisi3n del %CO₂ presente durante la prueba de combusti3n con apertura m3nima de la compuerta de aire de combusti3n

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT



Nota. Este grafico representa la disminuci3n del % de CO₂ presente en los gases finales emitidos con apertura m3nima.

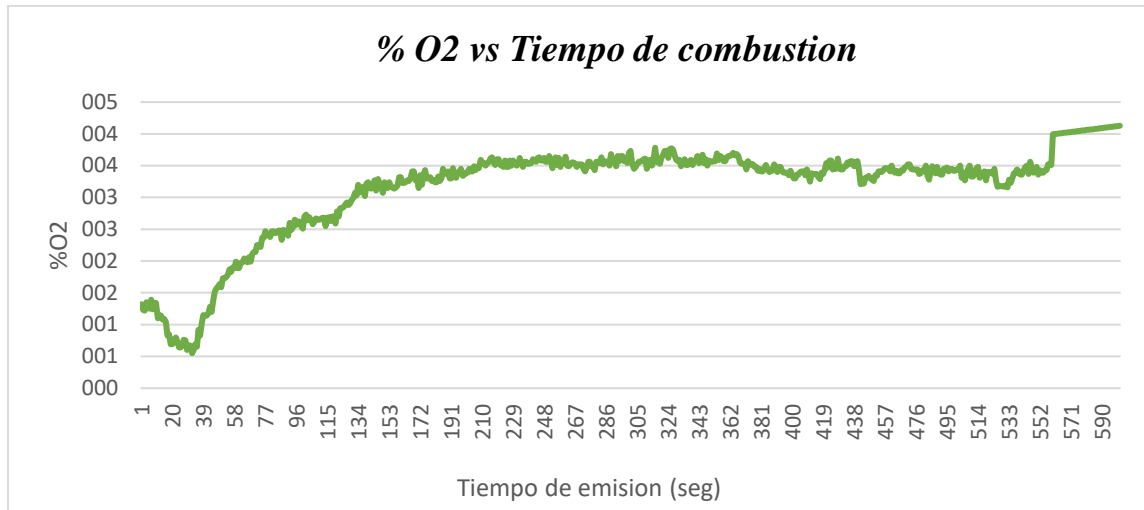
El CO₂ no se considera un gas altamente nocivo en materia de t3rminos medioambientales present3ndose siempre en todos los procesos de este tipo debido a que es uno de los gases productos de la combusti3n aun as3 el % est3 sobrepasando los limites definidos para espacios cerrados que estipula la norma de Testo el cual est3 en el 15% y obliga a que la combusti3n de PPNT se realice bajo un proceso de tratamiento de gases finales si no se tiene una salida concurrente al ambiente el cual pueda evitar perdida de conciencia en el personal y que no tenga un gran impacto en la contribuci3n a la formaci3n de gases de efecto invernadero, se observa que existe una disminuci3n constante de la presencia de CO₂ en los gases emitidos con lo cual este resultado indica que existen perdidas progresivas que ocurren en el proceso y nos permite concluir a trav3s de este resultado que la calidad de la combusti3n est3 bajando desde el inicio de la prueba debido a la calidad de la combusti3n, el resultado es similar en ambos procesos por tanto no se puede definir que la cantidad de aire entrante sea relevante en esta emisi3n.

- O₂:

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Figura 32.

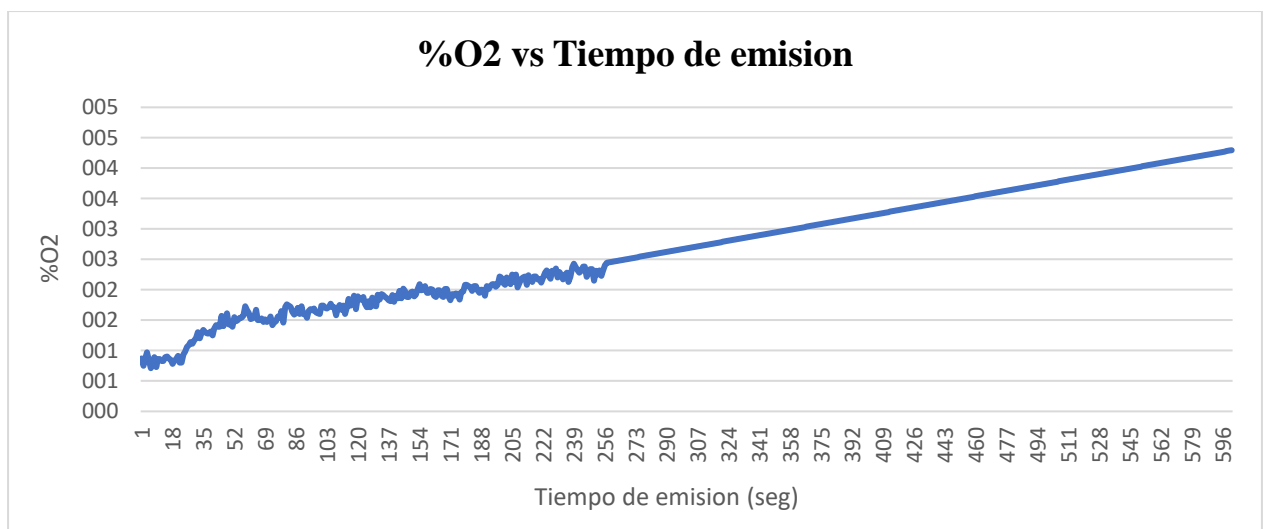
Emisión del %O₂ presente durante la prueba de combustión con apertura máxima de la compuerta de aire de combustión



Nota. Este grafico representa el aumento del % de O₂ presente en los gases finales emitidos con apertura máxima.

Figura 33.

Emisión del %O₂ presente durante la prueba de combustión con apertura mínima de la compuerta de aire de combustión



EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

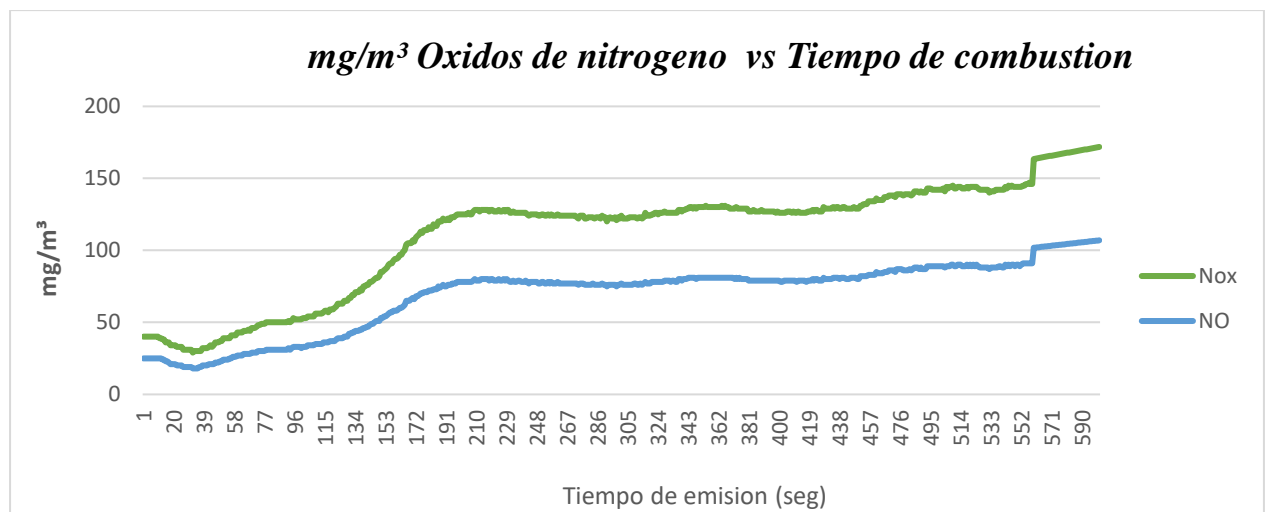
Nota. Este grafico representa el aumento del % de O₂ presente en los gases finales emitidos con apertura mínima.

En este resultado se puede observar que hay presencia de oxígeno en los gases provenientes del proceso por lo cual directamente esto está sucediendo debido al bajo rendimiento de la combustión que tiene esta prueba (rendimiento calculado en el inciso 4.5), esto ocurre por el exceso de aire que está alimentando la combustión ya que cuando la mezcla es demasiado rica produce que el oxígeno presente en estos no pueda oxidar todos los enlaces de hidrocarburos y por ende lleva a que ese exceso sea nuevamente expulsado por los gases de escape y que este aumentando durante el tiempo tomado indica que mientras avanza la prueba la cantidad alta de exceso llevo a que más % de oxígeno no reaccionara.

- NO_x:

Figura 34.

Emisión de los óxidos de nitrógeno en mg/m³ presente durante la prueba de combustión con apertura máxima de la compuerta de aire de combustión

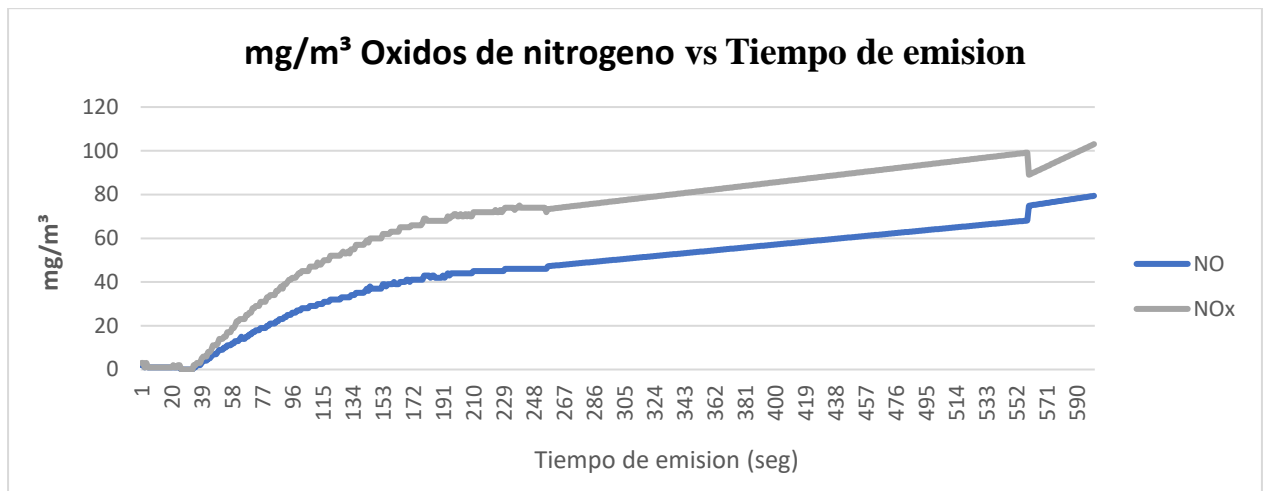


EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Nota. Este grafico representa el aumento de partículas de óxidos de nitrógeno presente en los gases finales emitidos con apertura máxima.

Figura 35.

Emisión de los óxidos de nitrógeno en mg/m³ presente durante la prueba de combustión con apertura mínima de la compuerta de aire de combustión



Nota. Este grafico representa el aumento de partículas de óxidos de nitrógeno presente en los gases finales emitidos con apertura mínima.

Los óxidos de nitrógeno es un dato tomado con intenciones de medir la eficiencia del proceso en términos ambientales explicado en el apartado 2.5, como se puede observar en las gráficas se evidencia que aumenta la presencia de estos óxidos proporcionalmente con el tiempo de emisión y su concentración es más alta cuando el proceso ocurre con máxima cantidad de aire en exceso contribuyendo este en la formación de este tipo de óxidos, el límite según la norma de calidad está en 200 mg/m³ y el conteo total de óxidos nitrosos NOx en la combustión de PPNT el cual incluye el NO que es un oxido que se transforma en NO2 directamente en contacto con la

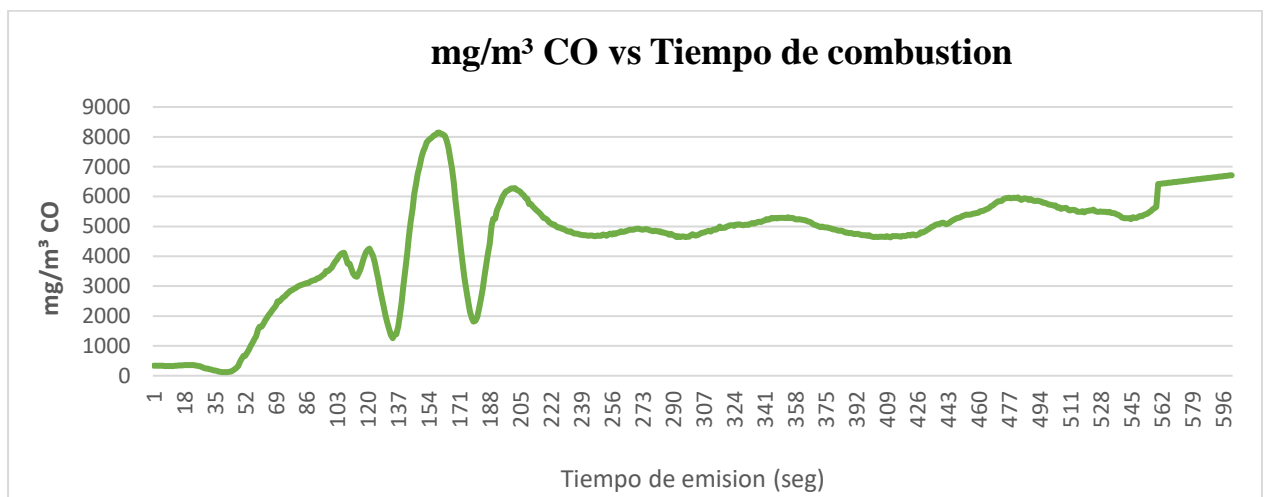
EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

atmosfera está en 172 mg/m^3 con lo cual se concluye en la tabla 6 que la formación de óxidos es aceptable en la quema de la materia en estudio.

- CO:

Figura 36.

Emisión del CO en mg/m^3 presente durante la prueba de combustión con apertura máxima de la compuerta de aire de combustión

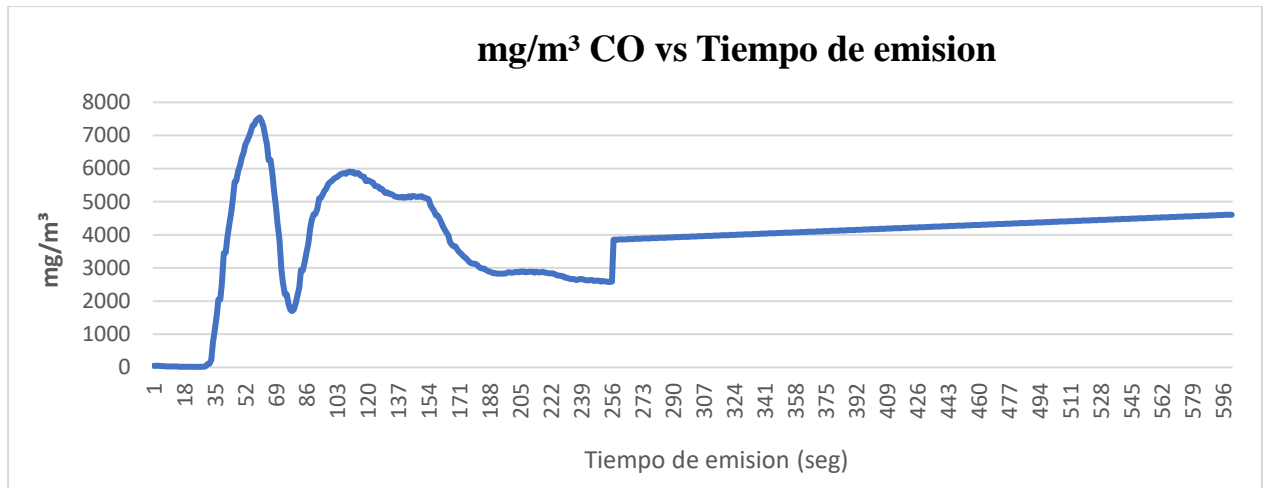


Nota. Este grafico representa el aumento de partículas de óxido de carbono presente en los gases finales emitidos con apertura máxima dejando en evidencia el tiempo en el que ocurre la degradación solida del combustible.

Figura 37.

Emisión del CO en mg/m^3 presente durante la prueba de combustión con apertura mínima de la compuerta de aire de combustión

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT



Nota. Este grafico representa el aumento de partículas de óxido de carbono presente en los gases finales emitidos con apertura mínima dejando en evidencia el tiempo en el que ocurre la degradación solida del combustible.

De este resultado se puede analizar que el valor máximo alcanzado y la cantidad máxima obtenida se dio durante la descomposición del material, el PPNT tiene la característica de que se transforma de un combustible sólido a líquido previo a su descomposición y esto ocurre dentro de los primeros 3 minutos de la combustión, por tanto el aumento de mg/m³ CO durante los primeros 180 segundos ocurre por la relación de hidrocarburos con respecto al oxígeno durante la combustión incompleta que hay en la transformación del PPNT de fase solida a fase liquida en donde después de equilibrarse continua el aumento de temperatura a causa del líquido inflamable que resulta post degradación de la fase sólida, este comportamiento de los gases emitidos está dejando en evidenciada la zona de descomposición del PPNT en su forma inicial que se podría decir gracias a los gases de emisiones de CO que ocurre completamente cerca de los 256 segundos, según la norma de calidad de emisiones permisibles en Colombia la quema de PPNT

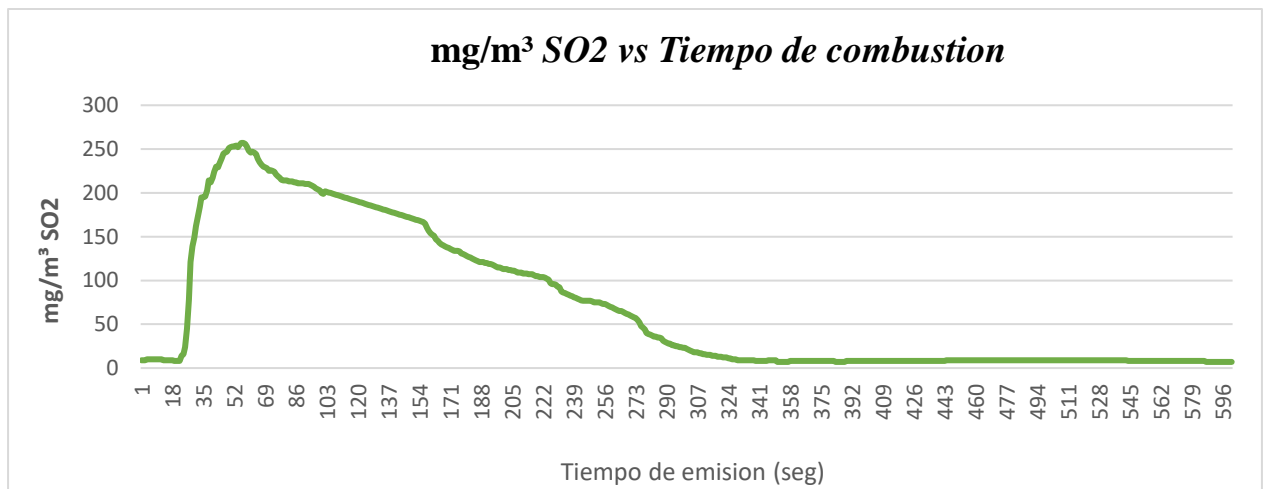
EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

se encuentra muy por debajo de los límites de emisión de CO como se puede observar en la tabla 6 con un valor pico en la combustión con apertura máxima de 8142 mg/m³.

- SO₂:

Figura 38.

Emisión del SO₂ en mg/m³ presente durante la prueba de combustión con apertura máxima de la compuerta de aire de combustión

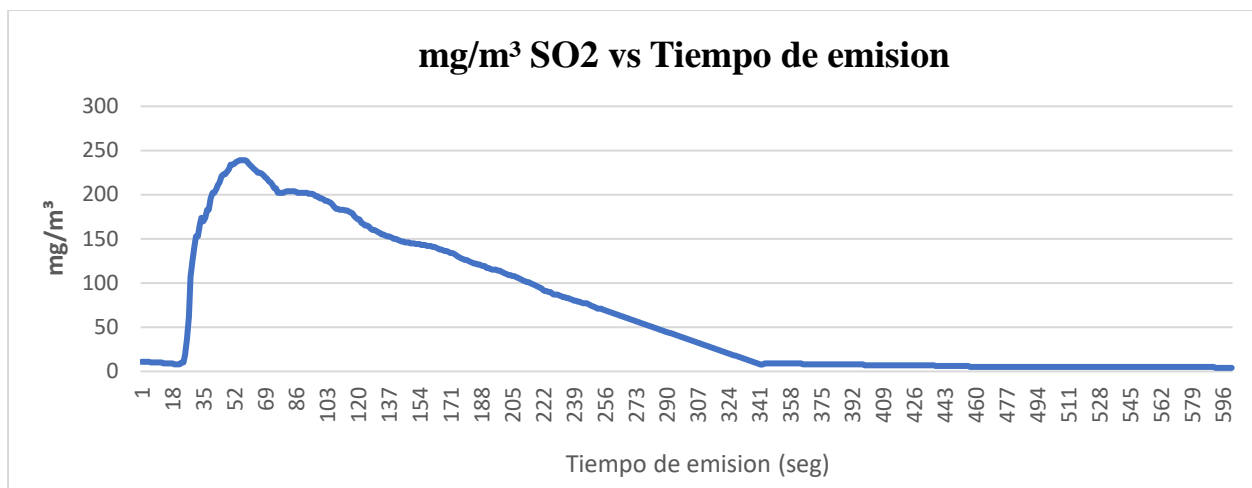


Nota. Este grafico representa la disminuci3n de part3culas de Di33xido de azufre presente en los gases finales emitidos con apertura m3xima en donde se evidencia su ausencia en la fase de descomposici3n liquida del PPNT.

Figura 39.

Emisi3n del SO₂ en mg/m³ presente durante la prueba de combust3n con apertura m3nima de la compuerta de aire de combust3n

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT



Nota. Este gráfico representa la disminución de partículas de Dióxido de azufre presente en los gases finales emitidos con apertura mínima en donde se evidencia su ausencia en la fase de descomposición líquida del PPNT.

Observando la gráfica esta nos indica que la formación de dióxido de azufre ocurre debido a la descomposición del combustible en forma sólida, ya que se puede ver que la presencia de este compuesto está contenida dentro de los primeros minutos los cuales hacen parte de la fase de oxidación del material sólido y durante la combustión de su fase líquida se ve casi que completamente disminuido y con tendencia a 0, para este tipo de compuestos la normativa ambiental colombiana estipula que no se debe emitir más de 100 mg/m³ durante una hora pero si se realiza por periodos cortos no mayores a 10 minutos se permite la emisión de un límite de 300 mg/m³ en donde podemos concluir un aprobado en términos ambientales durante la quema de PPNT ya que la emisión de SO₂ tiene relevancia durante 2 minutos en los cuales el máximo no supero los 250 mg/m³.

Tabla 6.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Comparación de resultados de emisiones entre el PPNT y la norma de calidad de aire

Contaminante	Nivel máximo de emisión permisible (mg/m ³)	Resultados máximos de las emisiones en el PPNT (mg/m ³)
SO ₂	100	251
NO ₂	200	172
CO	35000	8142

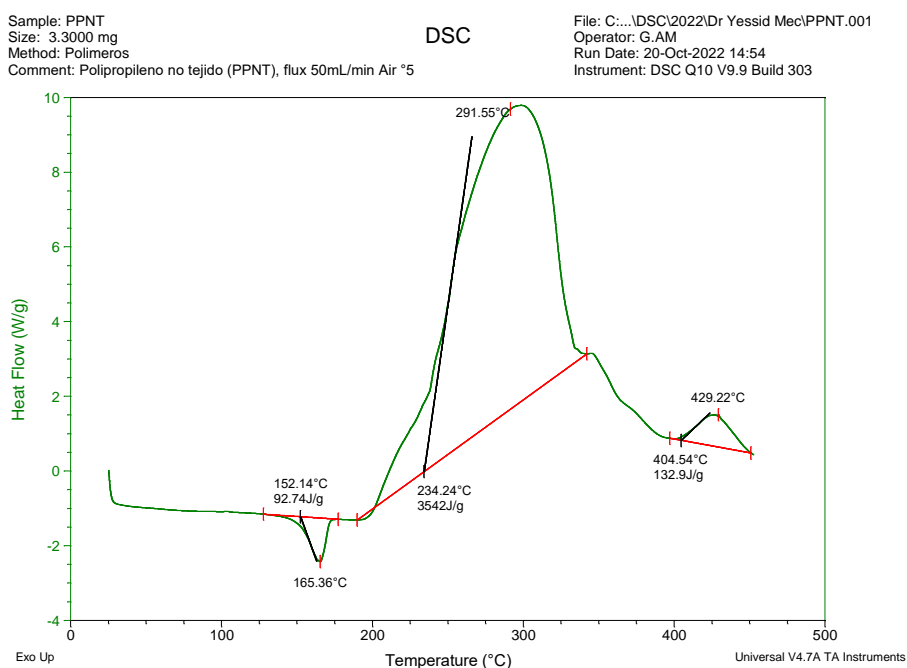
Nota. Esta tabla muestra la comparativa entre Nivel máximo de emisión permisible según la resolución colombiana y los resultados máximos obtenidos en la prueba de emisiones del PPNT.

4.7 Resultados prueba DSC

La grafica obtenida mediante la prueba DSC realizada al material es presentada a continuación:

Figura 40.

Resultados DSC



EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Nota. El grafico muestra el comportamiento térmico del PPNT obtenido por la prueba de calorimetría de barrido a través del Programa Universal V4.7^a.

Se observa que para una temperatura de 152,14 °C el PPNT sufre un proceso de fusión, tal y como se ha indicado anteriormente en el cuerpo del trabajo pues el material es un termoplástico que cambia de fase solida a liquida cuando reacciona con la temperatura, después de ello se evidencia una oxidación del material desde los 234,24 °C hasta los 291,55°C, durante este intervalo es transformado por completo el PPNT en un líquido inflamable, dado que el aumento de temperatura se hace de forma controlada el material se estabiliza durante el intervalo de temperatura de 291,55°C hasta 404,54°C en dónde ocurre nuevamente un proceso de oxidación que llega hasta los 429,22°C, este comportamiento también ocurrió al momento de realizar la prueba de temperatura de llama pero no fue posible presentarlo en las figuras 27, 28 y 29 pues los tiempos de medición de temperatura utilizados fueron de 30 segundos por lo que no se alcanza a representar de manera precisa los cambios ocurridos en cada aumento de temperatura. Al alcanzar el valor máximo del intervalo de temperatura la muestra aún no se había descompuesto por completo, demostrando lo descrito en el apartado 4.2 en donde se habla de una temperatura de volatilización alrededor de los 500°C, temperatura que no es posible alcanzar en el instrumento utilizado.

4.8 Potencial energético

Mediante la ecuación 24 presentada en la sección 3.9 podemos calcular que para una producción de 1,33 millones de toneladas de plástico producidas en el país en el año 2020 en dónde el 19,5% representa polipropileno obtenemos un total de 259350 toneladas de

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

polipropileno producido de las cuales el 79% se encuentra en botaderos y en el ambiente, lo que finalmente nos entrega una cantidad de 204886,5 toneladas de plástico que puede ser aprovechado para generar energía. Con el valor del PCI expresado como $3031,6 \frac{Kcal}{kg}$ o $12,6925 \frac{MJ}{kg}$ y una eficiencia de conversión del 22% se obtiene un valor de 6621 MW.

Hablando de energías renovables, Colombia logrará en 2023 multiplicar por más de 100 veces su capacidad instalada en esta materia con respecto al 2018. Actualmente, esta capacidad es de 725,38 megavatios (MW), que equivalen al consumo de 547.402 familias y contribuyen a la reducción de 921.333 toneladas de CO₂ al año (Departamento Nacional de Planeación, 2022).

Si comparamos el valor obtenido de 6621 MW con la capacidad esperada de 72538 MW según el DPN para el año 2023 obtenemos que la capacidad producida solo por la transformación del polipropileno representa el 9,13% de la energía producida en el país, lo cual representa un gran potencial energético.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

5. Conclusiones

-La caracterización fisicoquímica del PPNT nos permitió determinar que su porcentaje de materia volátil es del 99,66%, lo que indica que es un material altamente inflamable convirtiéndolo así en un buen combustible, sin embargo, al contener un porcentaje nulo de carbono fijo nos presenta un pésimo comportamiento como combustible sólido imposibilitando procesos térmicos con un alto tiempo de permanencia como parámetro de operación, por lo que su uso como combustible sería ideal en procesos que busquen por medio de tecnologías de aprovechamiento la producción de un combustible gaseoso como por ejemplo la gasificación.

- Los resultados obtenidos en la prueba de DSC permiten comprobar que el PPNT tiene una estabilidad térmica deficiente relacionada con su baja temperatura de fusión que es de 152,14°C, por lo que se puede reafirmar que el material no es apto para uso como combustible sólido.

- El PPNT como combustible en un proceso de quema directa presenta emisiones que cumplen con la norma de calidad de aire ambiental en Colombia según la resolución 2254 de 2017, además, la prueba de emisiones confirmó el comportamiento de goteo que tiene el material ya que alcanzó valores máximos de CO y de SO₂ durante el tiempo en el que fue sometido por encima de la temperatura de fusión.

-El porcentaje de aire en exceso calculado según la relación aire-combustible presentada en el inciso 4.5 genera un bajo rendimiento en la combustión, esto se debe a la difícil densificación del PPNT dada por su baja densidad que no permitió que las muestras de combustible utilizadas en la prueba de temperatura de llama fueran mayores a 60g.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

-El potencial energético calculado en el inciso 4.8 para el PPNT evidencia que su uso como combustible renovable es viable debido a que tiene una valoración estimada de producción del 9,13% de la energía renovable total generada en el país.

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

Referencias

- Ambientum*. (06 de 10 de 2022). Obtenido de La combustión como proceso de transformacion energética:
https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/la_combustion.asp
- Arqhys*. (12 de 2012). Obtenido de Incineración - tratamiento térmico:
<https://www.arqhys.com/construcciones/incineracion-tratamiento-termico.html>
- Barragán, C. (07 de Junio de 2019). *El Confidencial*. Obtenido de La guerra secreta de la basura: por qué Asia amenaza con tirar tu plástico al mar:
https://www.elconfidencial.com/mundo/2019-06-07/basura-asia-china-occidente_2058450/
- BBC*. (08 de enero de 2018). Obtenido de Por qué China quiere dejar de ser el basurero del mundo y cómo eso afecta al resto de los países: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-42591224>
- Castellanos, A. (2014). ESTUDIO DE LA RESPUESTA TÉRMICA DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS PVC ESPUMADO Y PMMA EN SITUACIONES DE INCENDIO. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
- Charris, J. F. (2002). *Termodinamica Aplicada*. Bucaramanga: UIS.
- Departamento Nacional de Planeación. (13 de Mayo de 2022). *Colombia multiplicará 100 veces su producción energética a partir de Fuentes No Convencionales de Energía Renovables en 2023* . Obtenido de <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Colombia-Energia-Renovables-en-2023.aspx>
- Greene. (16 de Septiembre de 2014). *Greene Blog*. Obtenido de <https://greene.es/descripcion-de-tecnologias-de-gasificacion/>
- Greenpeace*. (03 de octubre de 2018). Obtenido de Greenpeace anuncia campaña para frenar el avance del plástico en Colombia:
<https://www.greenpeace.org/colombia/noticia/issues/contaminacion/greenpeace-anuncia-campana-para-frenar-el-avance-del-plastico-en-colombia/#:~:text=Como%20parte%20del%20lanzamiento%20de,Gesti%C3%B3n%20de%20Residuos%20S%C3%B3lidos%20y>
- Grupo visiona*. (s.f.). Obtenido de ¿Qué es la Biomasa?:
<http://www.grupovisiona.com/es/biomasa>
- Gutiérrez, A. (17 de Septiembre de 2021). *La República*. Obtenido de La industria del plástico creció 22,2% frente al 2020 en el primer semestre:
<https://www.larepublica.co/especiales/la-revolucion-del-plastico/la-industria-del-plastico-crecio-22-2-frente-a-2020-en-el-primer-semester-3233461>
- Jigisha Parikh, S. C. (2004). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 487-494.
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química PUCP*, 37-40.
- Martínez, M. (octubre de 2021). *Hoy en la Javeriana*. Obtenido de ¿Y qué hacemos con tanta contaminación por tapabocas?: <https://www.javeriana.edu.co/hoy-en-la-javeriana/y-que->

EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN EL PPNT

hacemos-con-tanta-contaminacion-por-tapabocas/#:~:text=La%20ONG%20Oceans%20Asia%20revel%C3%B3,mil%20toneladas%20m%C3%A1s%20de%20contaminaci%C3%B3n

Ministerio del medio ambiente. (22 de diciembre de 1993). Obtenido de Ley General Ambiental de Colombia.

Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (s.f.). Obtenido de Sistemas de tratamiento: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Pirolisis.aspx#:~:text=La%20pirolisis%20es%20una%20degradaci%C3%B3n,produzcan%20las%20reacciones%20de%20combusti%](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Pirolisis.aspx#:~:text=La%20pirolisis%20es%20una%20degradaci%C3%B3n,produzcan%20las%20reacciones%20de%20combusti%20n)

Posada, B. (s.f.). La degradación de los plásticos. *Revista Universidad EAFIT*, 67-86.

Rodríguez, D. (02 de Junio de 2022). *Portafolio*. Obtenido de Colombia produce 1,4 millones de toneladas de plástico al año: <https://www.portafolio.co/economia/colombia-produce-1-4-millones-de-toneladas-de-plastico-al-ano-566367>

Royte, E. (12 de Marzo de 2019). *National Geographic Magazine*. Obtenido de Is burning plastic waste a good idea?: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/should-we-burn-plastic-waste>

Semana. (23 de octubre de 2021). Obtenido de ONU prevé que para 2030 se duplique la contaminación por plástico: <https://www.semana.com/sostenibilidad/medio-ambiente/articulo/onu-preve-que-para-2030-se-duplique-la-contaminacion-por-plastico/202112/>

Testo Argentina SA. (2018). Obtenido de Gases de combustión: <https://www.academiatesto.com.ar/cms/gases-de-combustion-1>

Brooke E. Shemwell & Yiannis A. Leventis (2000) Particulates Generated from Combustion of Polymers (Plastics), *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50:1, 94-102, DOI: [10.1080/10473289.2000.10463994](https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10463994)

Méndez, A., & Ramírez, A. (2020). *Estudio de la combustión de la borra de café como alternativa de aprovechamiento de este residuo*. [Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico]. Universidad Industrial de Santander.