

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Estudio técnico para el diseño de una línea de recuperación energética a partir de polipropileno de desechos residenciales e industriales

Trabajo de graduación presentado por Rudy Portillo Valle para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala,

2014

Estudio técnico para el diseño de una línea de recuperación energética a partir de polipropileno de desechos residenciales e industriales

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química

Estudio técnico para el diseño de una línea de recuperación energética a partir de polipropileno de desechos residenciales e industriales

Trabajo de graduación presentado por Rudy Portillo Valle para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala,

2014

Vo. Bo. :

(f) 
Ingeniero Luis Ernesto Núñez

Asesor

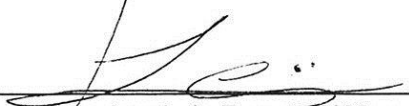
Colegiado No. 1191

Tribunal Examinador:

(f) 
Ingeniero Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

Director de Ingeniería Química

Colegiado No. 686

(f) 
Ingeniero Luis Ernesto Núñez

Asesor

Colegiado No. 1191

(f) 
Ingeniero Cristián Rossi Soza

Jefe de Laboratorio de Operaciones Unitarias

Colegiado No. 471

Fecha de aprobación: Guatemala, 24 de enero de 2014

A mi familia, por darme su apoyo, comprensión y fortaleza en los momentos difíciles.

A mis amigos, por haber compartido cada momento y guiarme por un buen camino.

A mis catedráticos, al departamento de Ing. Química, al Ing. Luis Núñez, al Lic. Ángel Ramírez y al Ing. Cristián Rossi, por haberme brindado sus conocimientos y experiencias que fueron vitales para mi crecimiento personal y profesional.

A Dios, por brindarme lo necesario en el momento indicado, permitiendo alcanzar mis sueños.

Contenido

Índice	iii
Lista de tablas.....	v
Lista de figuras	vii
Lista de gráficas	viii
Resumen	ix

Índice

I. Introducción	1
II. Objetivos.....	2
A. Objetivo general	2
B. Objetivos específicos	2
III. Justificación	3
IV. Marco teórico.....	4
A. Polímeros sintéticos:	4
B. Polipropileno (PP):	5
C. Reciclaje de polipropileno:	11
D. Clasificación del reciclaje de polipropileno (PP):	12
1. Reciclaje mecánico (Primario y Secundario)	12
2. Reciclaje químico (Ternario)	17
3. Como fuente de energía (Cuaternario)	18
E. Demanda de polipropileno a nivel internacional:	24
F. Usos del polipropileno:	26
V. Antecedentes.....	27
A. Desechos sólidos en Guatemala	27
B. Situación del reciclaje en Guatemala:.....	28
C. Problemática ambiental de la utilización de plásticos:.....	28
D. Regulaciones ambientales	29
E. Precio de la resina y energía eléctrica en Guatemala:	30
F. Aplicaciones de reciclaje de polipropileno:	30
VI. Metodología.....	32
A. Consulta bibliográfica y planificación del trabajo de graduación (Etapa preliminar):	32
B. Etapa experimental del trabajo de graduación:	32
C. Etapa de diseño del proceso:	33
D. Comparación económica:	34
VII. Resultados.....	35

VIII. Discusión	40
IX. Conclusiones	49
X. Recomendaciones.....	50
XI. Bibliografía.....	51
XII. Apéndice.....	55
Bases teóricas.....	55
A. Diagrama de entradas y salidas del proceso de recuperación energética de polipropileno: .	55
B. Diagrama de operaciones unitarias del proceso de recuperación energética de polipropileno:.....	56
C. Datos originales:	57
D. Cálculos de muestra:	57
1. Balance de masa:	57
2. Dimensionamiento de equipos:.....	61
a. Dimensionamiento de la caldera acuotubular.....	61
b. Dimensionamiento del turbogenerador y los equipos auxiliares:	62
c. Precalentamiento del bunker	68
d. Balance de energía para el consumo de los equipos	72
e. Comparación de ganancias a partir del producto final del reciclaje mecánico y la recuperación energética	73
E. Datos calculados:.....	78
Bases Experimentales.....	81
A. Datos originales	81
B. Cálculos de muestra	82
1. Análisis granulométrico.	82
2. Determinación del poder calorífico experimental del polipropileno	82
C. Datos calculados:.....	87
D. Análisis de error para la experimentación:.....	89
E. Figuras para la experimentación:.....	93

Lista de tablas

Tabla No.1. Densidad del polipropileno	9
Tabla No. 2. Clasificación del PP según la SPI:	11
Tabla No. 3. Poder calorífico de la gasolina y el etanol:	19
Tabla No. 4. Poder calorífico de diversos polímeros:	19
Tabla No. 5. Usos comunes de diferentes plásticos en Guatemala.	26
Tabla No. 6. Distribución de los residuos sólidos en la República de Guatemala para el año 2009:.....	27
Tabla No.7. Valores promedio de descarga de DQO y DBO según el tipo de industria en Guatemala	29
Tabla No.8. Composición generalizada de la basura según el país o ciudad.	29
Tabla No.9. Valores límite de emisiones a la atmósfera para la incineración de residuos según la UE.....	30
Tabla No.10. Precio de la resina de polipropileno y la energía eléctrica en Guatemala:	30
Tabla No.11. Descripción en las etapas del balance de masa y energía (diagrama de flujo del proceso) de la recuperación energética de polipropileno (PP).	38
Tabla No.12. Consumo y generación energético global e indicador de consumo de energía por kWh producido para la línea de recuperación energética.	38
Tabla No.13. Poder calorífico de los desechos domésticos e industriales de polipropileno (PP).....	39
Tabla No.14. Comparación económica de los ingresos estimados del producto final y la inversión inicial del reciclaje mecánico y la recuperación energética	39
Tabla No.15. Porcentaje de la distribución de los flujos globales en el proceso.	57
Tabla No.16. Porcentajes estimados de las pérdidas en el proceso para el balance de masa.	57
Tabla No.17. Características fisicoquímicas del bunker.	68
Tabla No.18. Especificaciones técnicas del equipo necesario en la línea de recuperación energética	69
Tabla No.19. Continuación de las especificaciones técnicas del equipo necesario en la línea de recuperación energética	70
Tabla No.20. Continuación de las especificaciones técnicas del equipo necesario en la línea de recuperación energética.....	71
Tabla No.21. Energía consumida al día para cada etapa del proceso en función del número de equipo y los requerimientos de energía.	72
Tabla No.22. Estimación del costo de los principales equipos en la línea de recuperación energética	74
Tabla No.23. Estimación del costo de fletes e impuestos.	75
Tabla No.24. Estimación del costo de los servicios en la planta.	75

Tabla No.25. Porcentaje de la distribución de los flujos globales en el proceso.	78
Tabla No.26. Balance de masa para cada etapa del proceso de recuperación energético.	79
Tabla No.27. Balance de masa global de la línea de recuperación energética.	80
Tabla No.28. Valores obtenidos para las entalpías y flujos de masa referidos a la Figura No.14 del ciclo regenerativo:	80
Tabla No.29. Valores obtenidos para el trabajo referido a la Figura No.13 del ciclo regenerativo.....	80
Tabla No.30. Masa inicial y final para cada molienda realizada con el polipropileno doméstico.	81
Tabla No.31. Datos originales de la masa del solvente, la masa del polipropileno utilizado y el poder calorífico obtenido del polipropileno por la bomba calorimétrica:	81
Tabla No.32. Primera molienda realizada de polipropileno doméstico para la determinación del poder calorífico.	87
Tabla No.33. Segunda molienda realizada de polipropileno doméstico para la determinación del poder calorífico.	87
Tabla No.34. Tercera molienda realizada de polipropileno doméstico para la determinación del poder calorífico.	87
Tabla No.35. Promedio de las tres moliendas realizadas de polipropileno doméstico para la determinación del poder calorífico.	88
Tabla No.36. Resultados del poder calorífico del polipropileno doméstico utilizando ter-butanol como solvente	88
Tabla No.37. Resultados del poder calorífico utilizando 1-butanol como solvente	88
Tabla No.38. Resultados del poder calorífico utilizando Etilenglicol como solvente	88
Tabla No.39. Resultados del poder calorífico utilizando Etilenglicol como solvente	88
Tabla No.40. Análisis de regresión para la determinación del poder calorífico del polipropileno doméstico con ter-butanol	89
Tabla No.41. Análisis de regresión para la determinación del poder calorífico del polipropileno doméstico con 1-butanol	89
Tabla No.42. Análisis de regresión para la determinación del poder calorífico del polipropileno doméstico con Etilenglicol	90
Tabla No.43. Análisis de regresión para la determinación del poder calorífico del polipropileno industrial con Etilenglicol	90
Tabla No.44. Estadística descriptiva para la determinación del poder calorífico del polipropileno industrial utilizando como solvente etilenglicol.....	92
Tabla No.45. Estadística descriptiva para la determinación del poder calorífico del polipropileno domiciliario utilizando como solvente etilenglicol.....	92

Lista de figuras

Figura No.1: Separación del crudo de petróleo	5
Figura No. 2. Cadena estructural del polipropileno isotáctico	6
Figura No. 3. Cadena estructural del polipropileno sindiotáctico.....	6
Figura No. 4. Cadena estructural del polipropileno atáctico	7
Figura No. 5: Mesa de aire para separar PP de PVC	14
Figura No. 6: Funcionamiento de la mesa de aire para separar la mezcla de PP/PVC	15
Figura No. 7: Cámara de combustión de lecho fluidizado para residuos solidos	20
Figura No. 8: Esquema general de una caldera acuotubular	21
Figura No. 9: Distribución porcentual de las resinas utilizadas en Norte América	25
Figura No. 10: Diagrama comparativo de bloques del reciclaje mecánico y la recuperación energética del polipropileno (PP) propuesto.	36
Figura No. 11: Balance de masa y energía global (diagrama de flujo del proceso) para la línea de recuperación energética de polipropileno (PP):	37
Figura No. 12: Diagrama de entradas y salidas del proceso de recuperación energética de polipropileno	55
Figura No. 13: Diagrama de operaciones unitarias del proceso de recuperación energética de polipropileno	56
Figura No. 14: Generación de energía según el ciclo regenerativo	62
Figura No. 15: Desecho de polipropileno doméstico antes de la molienda	93
Figura No. 16: Desecho de polipropileno doméstico después de la molienda	93
Figura No. 17: Problemas con la molienda del polipropileno	93
Figura No.18: Tamizaje del polipropileno reducido para obtener las partículas del mesh 60	94
Figura No. 19: Muestra de polipropileno industrial obtenido de los empaques de baterías.	94
Figura No. 20: Muestra de polipropileno doméstico.	94
Figura No. 21: Bomba calorimétrica y termómetro PAR y sistema de presurización con oxígeno.....	95
Figura No. 22: Problemas con la experimentación al utilizar ácido benzoico en lugar de solventes líquidos.....	95

Lista de gráficas

Gráfica No. 1. Representación gráfica de la demanda de plásticos en Europa	24
Gráfica No.2: Análisis granulométrico en tamizadora W.S Tyler a partir de la molienda de los desechos domésticos de polipropileno (PP).....	35
Gráfica No.3: Análisis lineal del poder calorífico en función del porcentaje de polipropileno doméstico y ter-butanol en la muestra.....	83
Gráfica No.4: Análisis lineal del poder calorífico en función del porcentaje de polipropileno doméstico y 1-butanol en la muestra.....	84
Gráfica No.5: Análisis lineal del poder calorífico en función del porcentaje de polipropileno doméstico y etilenglicol en la muestra.....	84
Gráfica No.6: Análisis lineal del poder calorífico en función del porcentaje de polipropileno doméstico y etilenglicol en la muestra.....	85
Gráfica No.7: Promedio del perfil de temperatura para la determinación del poder calorífico del polipropileno doméstico e industrial.....	86

Resumen

Se desarrolló un proceso de reciclaje de polipropileno (PP) a partir de desechos domésticos e industriales, con el propósito de estudiar su potencial energético como combustible. Así mismo se busca sentar bases para futuros procesos de recuperación energética en Guatemala.

Para cumplir con esto se elaboró un diagrama comparativo entre el reciclaje mecánico y la recuperación energética, se hizo la determinación del poder calorífico inferior del polipropileno en donde se encontró que era de 21.52 kJ/g para los desechos domésticos y de 21.44 kJ/g para los desechos industriales. Se hizo un análisis granulométrico para obtener el tamaño de partícula deseado en el proceso, que es de un mesh 60. Se elaboró la propuesta de un proceso con capacidad de 1036.5 kg/h para obtener el producto final que es la energía de 40,671.84 kWh al día.

Se realizó una comparación de las utilidades estimadas para la recuperación energética y para el caso hipotético que se venda la resina obtenida antes de la recuperación energética. Con base en la comparación de las utilidades percibidas se llegó a la conclusión, que es económicamente viable realizar la recuperación energética después de un periodo de 6 años, luego que se ha recuperado la inversión de la línea de recuperación energética.

I. Introducción

El polipropileno es uno de los polímeros mayormente utilizados en el mundo. El polipropileno más utilizado a nivel comercial es el homopolímero isostático, debido su característica como sólido semicristalino.

Lo que distingue al polipropileno es su rigidez, fuerza y resistencia al impacto debido a su larga estructura ramificada, con la característica que posee una baja densidad comparada a otros polímeros. Posee propiedades adecuadas para la elaboración de cajas para botellas, maletas, tapas de recipientes, etiquetas, cajas para acumuladores de automóviles, envases para alimentos, entre otras aplicaciones. Debido a las características fisicoquímicas del polipropileno, es un polímero que tiene un largo periodo de degradación. Por lo tanto, actualmente se ha convertido en un problema debido a la sobreproducción de productos a base de polipropileno. Debido a esta situación, se ha desarrollado procesos para su reciclaje. Entre los principales procesos se encuentra el reciclaje mecánico, el reciclaje químico y la recuperación energética.

El proceso de recuperación energética consiste en obtener la energía proveniente de la ruptura de los enlaces en el polímero de polipropileno para su posterior utilización. La ruptura de los enlaces se logra por medio de una reacción de combustión. Posteriormente, debido a la ruptura del enlace la energía liberada es transferida hacia el agua en una caldera acuotubular, para ser transportada en forma de vapor sobrecalentado. El vapor sobrecalentado acciona una turbina de vapor que a su vez, acciona un generador, transformando la energía mecánica en energía eléctrica.

En la actualidad se cuenta con muy pocas bases para llevar a cabo la recuperación energética de polipropileno y de otros polímeros en general. El proceso de recuperación energética puede tener suma importancia ya que es una alternativa para la disposición final del polipropileno y otros polímeros. Según la teoría, el polipropileno posee un alto poder calorífico comparable a cualquier combustible fósil como el bunker. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como alcance proponer un proceso de recuperación energético a partir de desechos de polipropileno domiciliarios e industriales, con el objetivo principal de obtener una referencia para futuros procesos de reciclaje energético en Guatemala. El trabajo consiste en un planteamiento teórico del proceso en el cual se elaboró un diagrama de entradas y salidas, un diagrama de operaciones unitarias y un diagrama de flujo para el proceso de recuperación energético. Se realizó de forma experimental la determinación del poder calorífico del polipropileno como punto de partida.

II. Objetivos

A. Objetivo general

1. Desarrollar un proceso de reciclaje de polipropileno (PP) a partir de desechos domésticos e industriales, con el propósito de estudiar su potencial energético y sentar bases para futuros procesos de valorización energética.

B. Objetivos específicos

1. Realizar un diagrama comparativo de bloques del proceso de reciclaje mecánico y la recuperación energética para el polipropileno (PP).
2. Realizar un análisis granulométrico, en el molino de martillos instalado en la universidad del valle de Guatemala para determinar si es factible moler desechos domésticos de polipropileno (PP).
3. Establecer los principales equipos involucrados en una línea de recuperación energética a partir de desechos domésticos e industriales de polipropileno (PP) con el fin de realizar un balance de masa y energía del proceso.
4. Realizar pruebas experimentales del poder calorífico de los desechos domésticos e industriales de polipropileno (PP) y establecer si existe relación con el valor reportado en la literatura.
5. Realizar una comparación económica de los ingresos estimados de la resina obtenida en el reciclaje mecánico y la energía obtenida en la línea de recuperación energética de polipropileno (PP).

III. Justificación

El polipropileno es uno de los termoplásticos más utilizados a nivel global, según la European Plastic Converters (EuPC) el polipropileno representa el 19 % de la demanda total de plástico en Europa. Este porcentaje traducido en números representa 8×10^6 toneladas al año. Esto quiere decir que el polipropileno es el segundo plástico más utilizado en Europa, junto con otros tipos de plásticos clasificados con el número 7 según la SPI (The Industry Trade Association). En Norte América, el uso de las resinas de polipropileno representa el 25% del total, lo que significa que este tipo de resina es la más utilizada en esa región. Los patrones de consumo de plástico y la demanda de polipropileno son significativos a nivel mundial. En Guatemala se desconoce la cantidad de polipropileno utilizado, sin embargo, el 13% del total de desechos sólidos corresponde a desechos plásticos. El polipropileno debido a sus propiedades, no fue diseñado para degradarse biológicamente, ya que presenta una lenta degradación respecto al tiempo. Debido a lo anterior y una demanda alta, existe una diversidad de productos post-consumo que no son reciclados.

Se puede decir que en Guatemala el reciclaje no ha tenido auge y se tiene una pobre cultura en relación al tema, por lo tanto, existen muy pocos planes para tener una adecuada recolección y clasificación de los desechos plásticos. Esto se ve reflejado en la falta de información acerca de la clasificación, distribución y cuantificación de los desechos plásticos localmente. Esta problemática ha motivado a buscar soluciones o alternativas. Una alternativa es el reciclado mecánico de los productos post-consumo, sin embargo, si se hace un mal reciclaje del polipropileno el producto final va tener significativamente menor calidad en sus propiedades físicas, comparado a un producto a partir de una resina virgen. Es por esto que al proponer una recuperación energética del polipropileno no se tiene el problema de la calidad en nuevos productos a partir de resinas recicladas, ya que únicamente se va aprovechar el potencial energético que posee el polipropileno como combustible.

El polipropileno, debido a que proviene de subproductos del petróleo, posee un poder calorífico similar a combustibles utilizados actualmente para producir energía. Al comparar las fuentes de energía se puede ver el potencial energético del polipropileno como una fuente de energía a partir de un producto post-consumo. El contenido energético del polipropileno también se puede comparar con un combustible alternativo como el etanol. Esta comparación del poder calorífico del polipropileno con otros combustibles motiva al estudio de la comprobación del contenido energético del polipropileno, ya que existe en abundancia y podría ser una alternativa viable que podría resolver la problemática de los productos post-consumo de polipropileno.

IV. Marco teórico

A. Polímeros sintéticos:

Se puede definir a los polímeros como macromoléculas compuestas por varias moléculas pequeñas denominadas monómeros. Los polímeros sintéticos son el resultado de la polimerización de derivados del petróleo. Estos últimos se organizan en cuatro categorías principales en función de sus comportamientos físicos, siendo éstos: termoplásticos, fibras, elastómeros y resinas termofijas (McMurry, 2008).

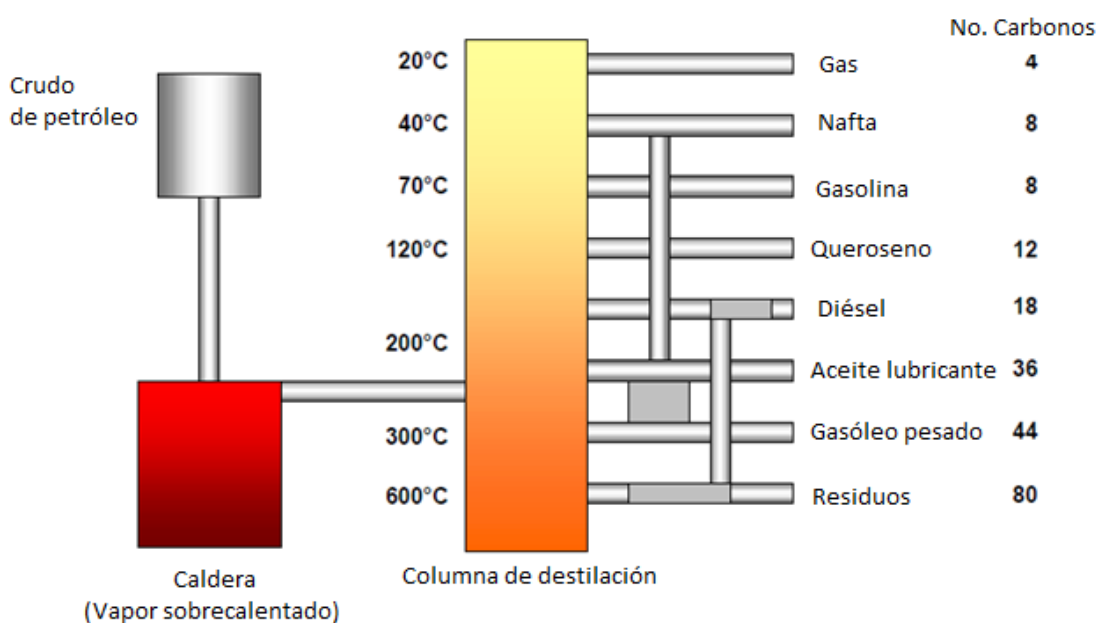
1. Clasificación de los polímeros sintéticos según su comportamiento físico:

- a. Fibras: Son filamentos delgados producidos por extrusión de polímeros fundidos. Estos filamentos o fibras son enfriados y extraídos, lo que provoca una orientación de los pequeños cristales a lo largo de los filamentos, dando como resultado un aumento de la resistencia a la tensión (McMurry, 2008).
- b. Elastómeros: Son polímeros con propiedades especiales en su estructura que le permiten alargarse y regresar a su estructura original. Poseen una temperatura de transición baja y pocos enlaces entrecruzados. Esto provoca que sus cadenas se mantengan estables. Las cadenas poseen formas irregulares para evitar formar los pequeños cristales, como en las fibras. Las fuerzas de Van der Waals son débiles para mantener el alargamiento y es por esto que el material regresa a su estructura original enrollada. Entre los elastómeros más comunes se encuentra el hule natural o el caucho (McMurry, 2008).
- c. Resinas termofijas: Estos polímeros, al estar influenciados por una fuente de calor, se transforman en una masa sólida insoluble y formando una cantidad considerable de enlaces entrecruzados. Un ejemplo de resinas termofijas es la baquelita, la cual es una resina fenólica cuya dureza es parecida a la de una piedra (McMurry, 2008).
- d. Termoplásticos: Son polímeros que poseen características específicas en las que a temperaturas de transición vítrea (T_g) relativamente altas, muestran características flexibles o moldeables. Estos presentan un entrecruzamiento leve o casi nulo, lo cual se observa cuando las cadenas individuales se deslizan una sobre otra cuando se encuentran fundidos. Entre los termoplásticos más conocidos se encuentran el polietilentereftalato (PET), polietileno de alta densidad (HDPE), el policloruro de vinilo (PVC), polietileno de baja densidad (DPE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS), entre otros (McMurry, 2008).

B. Polipropileno (PP):

1. **Orígenes del polipropileno:** El crudo de petróleo está formado por hidrocarburos, que necesitan ser separados para obtener los productos derivados que se utilizan diariamente. Como se muestra en la Figura No. 1, la separación de las fracciones del crudo de petróleo en la destilación produce subproductos con cierto número de carbonos en su cadena estructural. El polipropileno y otras olefinas, como el polietileno, se dan como consecuencia de separar las fracciones del gas de petróleo y la nafta (Recoup, 2005).

Figura No.1: Separación del crudo de petróleo



(Recoup, 2005)

El polipropileno es un material termoplástico producido por la polimerización de moléculas de propileno. Tiene buenas características de resistencia eléctrica, baja permeabilidad al agua, resistencia a interacciones químicas específicas. Su coloración es variada, desde ligeramente transparente hasta un tono opaco, es inodoro y sin sabor. Tiene facilidades en diversas industrias por sus buenas características físicas. Sus aplicaciones son variadas, desde la industria automotriz, como en estructuras internas de automóviles, hasta recipientes para baterías. En la industria alimenticia se utiliza para recipientes a usar en cuartos fríos y tapaderas de envases de PET, entre otros (Karian, 2003) (UNEP, 2009).

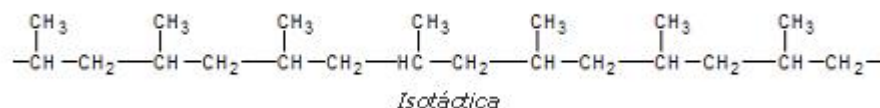
Tiene excelentes y deseables propiedades físicas, mecánicas y térmicas cuando se utiliza en aplicaciones de temperatura ambiente. Es relativamente rígido y tiene un punto de fusión alto, baja

densidad, y relativamente buena resistencia al impacto. Estas propiedades se pueden cambiar de una manera relativamente sencilla mediante la alteración de la regularidad de la cadena (con la tacticidad), la distribución del contenido, las longitudes de la cadena, la incorporación de un monómero tal como el etileno en las cadenas de polímeros, y la incorporación de un modificador de impacto en la formulación de la resina (Karian, 2003).

2. **Tacticidad:** Las propiedades del estado sólido del polipropileno se producen debido a la forma asimétrica del monómero de propileno. Se diferencia del monómero de etileno debido a que tiene un grupo metilo unido a uno de los carbonos olefinicos. Esta naturaleza asimétrica del monómero de propileno crea varias posibilidades para la unión en la cadena de la molécula del polímero y da lugar a lo que se conoce como los isómeros estructurales y los isómeros estereoquímicos en la cadena del polipropileno (Karian, 2003)

a. **Polipropileno isotáctico:** Si los grupos metilos se encuentran todos de un lado de la cadena como se muestra en la Figura No. 2, se le conoce como isotáctico. El PP isotáctico es el más comercializado y se elabora por catálisis, produciendo cadenas cristalizables de polímeros. Esto da lugar a un producto sólido semicristalino, con buenas propiedades físicas, mecánicas y térmicas (Karian, 2003).

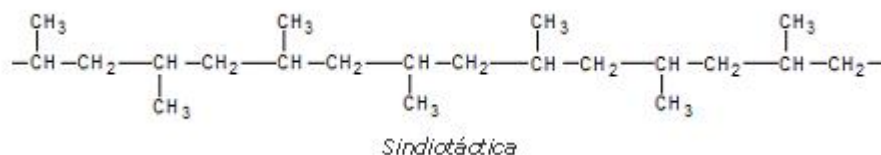
Figura No. 2. Cadena estructural del polipropileno isotáctico



(Karian, 2003)

b. **Polipropileno sindiotáctico:** Si los grupos metilos se encuentran alternados en la cadena del polímero como se muestra en la Figura No. 3, se le conoce como sindiotáctico. El PP sindiotáctico no es un producto comercial de gran volumen ya que es mucho menos cristalino que el PP isotáctico (Karian, 2003).

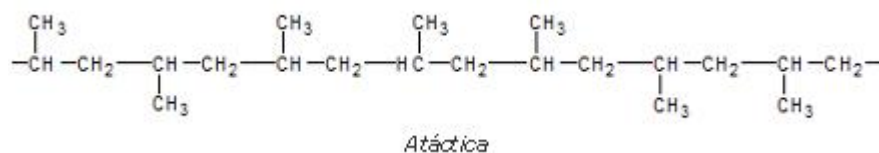
Figura No. 3. Cadena estructural del polipropileno sindiotáctico



(Karian, 2003)

c. **Polipropileno atáctico:** Es el que se conoce por tener configuración aleatoria de grupos metilos a lo largo de la cadena, como se muestra en la Figura No. 4, lo que proporciona poca o ninguna simetría. Es otra forma de polipropileno, producido en menor cantidad, como un subproducto de la producción de polipropileno isotáctico, ya que tiene propiedades mecánicas y térmicas muy pobres. Este material es blando y pegajoso, por lo que es utilizado en adhesivos y selladores (Karian, 2003).

Figura No. 4. Cadena estructural del polipropileno atáctico



(Karian, 2003)

Cuando se utiliza el término polipropileno, generalmente se refiere a un material que tiene alta tacticidad, lo que significa un alto contenido isotáctico. Los materiales de polipropileno de alta tacticidad tienen propiedades físicas, mecánicas y térmicas deseables en el estado sólido (Karian, 2003).

3. **Tipos de polipropileno:** La mayoría de las propiedades principales del PP en el estado de fusión, se derivan de la longitud media de las cadenas de polímeros y la amplitud de la distribución de las longitudes de cadena del polímero en un producto en específico. En el estado sólido, las principales propiedades del PP reflejan el tipo y la cantidad de regiones cristalinas y amorfas formadas a partir de las cadenas de polímeros (Karian, 2003).

El polipropileno semicristalino es un material termoplástico que contiene dos fases, una cristalina y otra amorfa. La cantidad relativa de cada fase depende de las características estructurales y la estereoquímica de las cadenas de polímeros, y las condiciones en las que la resina se convierte en productos finales, tales como fibras, películas y diversas otras formas geométricas durante su fabricación por extrusión termoformado o moldeo (Karian, 2003).

a. **Homopolímero (HPP):** Es el material más ampliamente utilizado en la variedad del polipropileno. Se hace en diferentes diseños de reactores, utilizando catalizadores que unen los monómeros de una manera estereoespecífica. Esto da lugar a cadenas de polímeros que son cristalizables. La cristalización depende de las condiciones de transición a las que la masa enredada de cadenas poliméricas se funde (Karian, 2003).

El homopolímero es un sistema de dos fases que contiene las regiones tanto cristalinas y no cristalinas. El homopolímero no cristalino o amorfo, se compone de regiones isotácticas y atácticas. El PP isotáctico es cristalizable en las regiones amorfas y cristalizará lentamente con el tiempo, hasta el límite de que el entrelazamiento se lo permita (Karian, 2003).

La cristalización de las cadenas es un factor que determina el grosor de los pequeños cristales, y el espesor de los mismos determina la cantidad de energía que se requerirá para lograr fundir el polipropileno (temperatura de fusión) (Karian, 2003).

b. **Copolímero al azar (RCP):** El copolímero al azar es un copolímero de etileno/propileno elaborado en un reactor por la copolimerización del propileno y una pequeña cantidad de etileno (usualmente 7% o menos). La presencia de etileno cambia las propiedades en la cadena del polímero provocando cambios en las propiedades del PP. El monómero de etileno en la cadena del PP se manifiesta como un defecto en la regularidad de la cadena, lo que inhibe la cristalización de la cadena. A medida que aumenta el contenido de etileno, el espesor de los pequeños cristales disminuye gradualmente, y esto se manifiesta en un punto de fusión más bajo. La cantidad de etileno incorporada en la cadena molecular, está generalmente limitado por las propiedades termodinámicas, ópticas y mecánicas (Karian, 2003).

c. **Copolímero de impacto (ICP):** Son mezclas físicas de homopolímero (HPP) y el copolímero al azar (RCP), cuya mezcla global puede tener un contenido de etileno en un rango de 6 al 15% en peso. Estos se venden en el mercado donde se necesita mejorar la resistencia al impacto a bajas temperaturas, especialmente a temperaturas de cuartos fríos o congeladores (Karian, 2003).

4. **Propiedades mecánicas:** Las principales propiedades de interés del PP son su rigidez, fuerza y resistencia al impacto. La rigidez se mide determinando el módulo de flexión, para lo cual se usa una prueba de flexión y resistencia al impacto en un número de ensayos diferentes de impacto. Estas propiedades se utilizan para predecir las propiedades de los artículos moldeados. La fuerza se define generalmente por la tensión en el "Yield point" en lugar de usar la fuerza de rotura. Sin embargo, la resistencia de rotura se especifica para materiales como fibras o películas "films" bajo tensión por atracción. Para comprender el uso y poder comparar las propiedades mecánicas, es importante recordar que las propiedades no son medidas de las propiedades de las resinas, si no que de los productos fabricados a partir de las mismas (Karian, 2003).

El módulo de flexión o rigidez aumenta a medida que aumenta el nivel de cristalinidad en un producto de PP, sin embargo, también depende del tipo de morfología de los cristales (Karian, 2003).

5. **Peso molecular y distribución del peso molecular:** La cadena de moléculas de los monómeros en el polímero de polipropileno consiste en moléculas de diferente peso molecular. Es por esto que se utiliza un promedio para estimar el peso molecular del polipropileno y se calcula una distribución del peso molecular. Se utiliza diferentes términos para nombrar el peso molecular, por ejemplo: M_n se refiere a las propiedades físicas del sólido. M_w se refiere a las propiedades de viscosidad de la masa fundida, y M_z se refiere a las propiedades elásticas de la masa fundida. Debido a que la determinación por cromatografía de estos pesos moleculares son difíciles de tabular se utiliza una relación para $M_w=M_n$, se ha determinado que da buenos resultados en la estimación de la distribución del peso molecular (Karian, 2003). Se muestra una aproximación para la densidad del PP en la Tabla No. 1.

Tabla No.1. Densidad del polipropileno

Densidad de termoplásticos comunes	
Plástico	Densidad (g/cm ³)
Polipropileno	0.90
Polietileno de baja densidad (LDPE)	0.90
Polietileno de alta densidad (HDPE)	0.95
Poliestireno	1.05
Poliamida (PA6 o PA66)	1.15
Cloruro de Polivinilo (PVC)	1.40
Tereftalato de Polietileno (PET)	1.40

(Goodship, 2007)

En la Tabla No. 1 se muestra la densidad para el polipropileno con un valor de 0.90 g/m³.

6. **Reología:** La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia que para el caso del PP, el interés se encuentra en su viscosidad y elasticidad del estado fundido, del sólido. La viscosidad del PP es muy importante en su estado fundido, ya que se refiere a la facilidad con la que un producto de PP puede ser extruido o moldeado por inyección. En la extrusión de fibra, la elasticidad es importante para la habilidad de procesar el producto del PP, debido a que se refiere a la facilidad con la que un material puede mezclarse en una fibra. La mayoría de las resinas de PP se utilizan para operaciones de moldeo por inyección. La viscosidad de un producto de PP está relacionada con su peso molecular (M_w) (Karian, 2003).

La dependencia de la velocidad de deformación en estado fundido en PP está relacionada con su distribución de peso molecular, que se describe por la relación de los promedios de M_w a M_n . En el PP las propiedades reológicas pueden ser controladas mediante catalizadores de Ziegler-Natta, que son complejos organometálicos de metales de transición. Estos catalizadores

proporcionan ventajas como el hecho de que permiten configurar linealmente la cadena del polipropileno. Con el catalizador Ziegler-Natta se puede controlar la estereoquímica del polímero. La distribución del peso molecular se puede hacer más estrecho mediante la adición de un peróxido en la etapa de fabricación combinado por extrusión, en el que los estabilizadores y otros aditivos se incorporan normalmente en el producto del reactor de PP antes de la peletización (Karian, 2003) (McMurry, 2008).

7. **Morfología:** El homopolímero de PP existe como una mezcla de dos y posiblemente un sistema trifásico de fases cristalinas y amorfas, con esta última que comprende una parte isotáctica cristalizable y una parte no cristalizable atáctica. El no cristalizable posee en pequeñas cantidades un material oleoso de bajo peso molecular a un nivel de 1% o menor. Los niveles típicos de cristalinidad en un gránulo de PP extruidos están en el rango de 60-70%. Una forma de describir la morfología del PP es considerar un conjunto de cristales que actúan como enlaces físicos entrecruzados en una matriz amorfa (Karian, 2003).

En la fase cristalina o monoclinica, es la forma cristalina dominante de PP con un punto de fusión alrededor de 160°C. La fase hexagonal es menos común y menos estable. Este último tiene un punto de fusión alrededor de 145°C. Los niveles típicos de los pequeños cristales hexagonales están a menos del 5% en piezas moldeadas por inyección (Karian, 2003).

8. **Análisis térmico del polipropileno (PP):** Por medio de la calorimetría diferencial de barrido se obtuvo la temperatura de fusión, que se toma como el máximo pico endotérmico y el calor de fusión, determinado mediante la integración del área bajo el pico endotérmico. La temperatura de fusión del PP homopolímero es de aproximadamente 160°C y del copolímero al azar es de aproximadamente 145°C. Los copolímeros de impacto tienden a tener una menor temperatura de fusión. De igual forma, en el enfriamiento de la calorimetría diferencial de barrido del PP a partir de la masa fundida se produce la cristalización. El pico mínimo exotérmico define la temperatura de cristalización. Esta temperatura es una indicación de la rapidez con que cristaliza el PP. Cuanto mayor sea la temperatura, más rápida es la cristalización. Los agentes de nucleación añadidos al PP aumentan la velocidad de cristalización, resultando en una temperatura de cristalización más alta (Karian, 2003).

Con la calorimetría diferencial de barrido también se determinó la temperatura de transición vítrea. Esta es la transición en el que los materiales amorfos (no cristalinos) se someten en el cambio del estado líquido a un estado de mayor viscosidad (estado gomoso). En el PP isotáctico es difícil de detectar por medio de calorimetría diferencial de barrido, debido a que la concentración de PP amorfo es muy reducida, pero la detección es fácil en un PP atáctico. La temperatura de transición vítrea se encuentra por lo general en aproximadamente 15°C (Karian, 2003).

Se realizan otros análisis técnicos, por ejemplo el análisis termomecánico. En este tipo de análisis se monitorean los cambios mecánicos en función de la temperatura. Obteniendo características de expansión y penetración o el comportamiento de tensión-deformación. Se utiliza también un análisis mecánico dinámico en donde las variaciones con la temperatura de los diversos módulos son determinados, y esta información se utiliza para obtener información como las temperaturas de transición vítrea. Se utiliza también el análisis termogravimétrico para observar cambios de peso en función de la temperatura o el tiempo. Esta información se utiliza para evaluar la estabilidad térmica y el comportamiento de descomposición (Karian, 2003).








C. Reciclaje de polipropileno:

El reciclaje se basa en la estrategia del tratamiento de desechos en función de las 3 “Rs” conocida como: Reducir, Reutilizar, Reciclar. Cuando los materiales, como en este caso, el polipropileno alcanza el final de su vida útil, este es desechado y en ese momento se convierte en un residuo sólido que puede ser reutilizado ya que tiene el potencial de seguir una estrategia sostenible y con ello reducir los residuos (JSPV, 2010).

La sociedad de industria del plástico (SPI) ha clasificado los diferentes tipos de plásticos para facilitar su recolección y separación post-consumo. Esta clasificación ha sido adoptada por todo el mundo para diferenciar las resinas según el tipo de polímero utilizado al momento de su fabricación. Esto también facilita el conocimiento de sus propiedades y aplicaciones en diversas industrias. (SPI, 2012)

Clasificación del Polipropileno según la SPI:

Tabla No. 2. Clasificación del PP según la SPI:

Tipo de resina	Abreviatura	Código	Símbolo
Tereftalato de polietileno	PET/PETE	1/01	
Polietileno de alta densidad	HDPE/PEAD	2/02	
Cloruro de polivinilo	PVC/V	3/03	
Polietileno de baja densidad	LDPE/PEBD	4/04	
Polipropileno	PP	5/05	
Poliestireno	PS	6/06	
Otros	OTHER/OTROS	7/07	

(SPI, 2012)

El polipropileno se clasifica simbólicamente según la tabla No. 2 con el código 5/05.

D. Clasificación del reciclaje de polipropileno (PP):

Existen cuatro tipos de reciclaje de material: El reciclaje de polipropileno primario, consiste en PP limpio sin contaminantes, por lo general residuos del proceso de producción de PP. El secundario consiste en el manejo de las mezclas de plástico residual (PP, PE etc.) para su futuro reciclaje. El reciclaje primario y secundario pertenecen a la categoría de reciclaje de tipo mecánico. El reciclaje terciario consiste en el reciclaje químico del PP ya que en este tipo se persigue una recuperación de los monómeros del PP. Y por último el reciclaje cuaternario consiste en el aprovechamiento de los residuos de PP como fuente de energía al quemarse o incinerarse. (CGP+L, 2004).

1. Reciclaje mecánico (Primario y Secundario): El reciclaje mecánico es el método más común del reciclaje de polipropileno. En este proceso primero se debe realizar una revisión del tipo de producto que se desea reciclar. Puede ser que tenga diversas formas como baldes, piezas moldeadas etc. Por esto se debe reducir en tamaño, limpiar, separar y secar antes de poder producir un nuevo producto de valor. (Goodship, 2007)

Se debe tomar en cuenta que las características del polipropileno pueden cambiar en función de la exposición térmica, mecánica (esfuerzo cortante), oxidativa y los procesos de degradación fotoquímica. Es por esto que las características del polipropileno reciclado no van a tener las mismas características que el polipropileno virgen. Lógicamente para producir productos de alta calidad se debe tener materias primas de alta calidad. Para esto se debe tomar en cuenta si el polipropileno se encuentra contaminado con metales o madera u otros compuestos orgánicos. Se debe tomar en cuenta el tamaño del "pellet" o la densidad aparente luego de realizar la reducción. Es importante el tamaño del "pellet" para que la alimentación en las máquinas de procesamiento por moldeo, inyección, extrusión o moldeo por soplado según sea el caso sea eficiente. (Goodship, 2007)

a. Clasificación de plásticos: En general los plásticos post-consumo se encuentran en los vertederos sin tener ninguna distinción con relación a otros materiales, es por esto que se puede considerar la clasificación como el paso más importante en el proceso del reciclaje mecánico. Para poder tener específicamente las propiedades del PP no se tiene que mezclar ningún otro tipo de material en el proceso. Durante la clasificación se deben retirar del proceso los restos de papel, plásticos distintos al PP, metales u otros compuestos que puedan contaminar el proceso. También es importante en algunos casos clasificar el PP por color, sin embargo, esto afecta únicamente a la apariencia física, por lo que dependiendo de la aplicación posterior es prioridad realizar la clasificación por color (Barcala *et al.*, s.f.) (Tall, 2000) (Brandrup, 1996) (VERC, 2005).

Se ha buscado soluciones al problema de clasificación y se ha encontrado facilidades para lograr el objetivo. A continuación se mencionaran algunas de las opciones que existen para clasificar los materiales indeseados para el proceso de reciclaje mecánico. Estas opciones se pueden utilizar simultáneamente para lograr mejores resultados (Bruno, s.f.) (Barcala *et al.*, s.f.).

1) **Clasificación manual:** La clasificación de este tipo consiste en designar personas dentro del proceso a separar los plásticos de los otros residuos sólidos. Es decir, cuando los residuos sólidos son transportados en bandas, las personas van clasificando los plásticos según la numeración designada por la SPI. Las personas deben ser muy cuidadosas ya que no todos los plásticos tienen esta numeración, por lo tanto, deben realizar una inspección visual. Este tipo de clasificación está sujeta a muchos errores y existe la posibilidad de mezclas indeseables en el proceso. Esta técnica es utilizada más comúnmente en procesos que poseen residuos de gran tamaño y es por esto que dicha técnica es utilizada para aplicaciones que no necesiten específicamente buenas propiedades físicas en su posterior aplicación (VERC, 2005) (Tall, 2000).

2) **Clasificación por densidad:** Esta clasificación se hace usando flotación y hundimiento, y es más eficiente realizarla junto con el proceso de lavado. Se utilizan las aproximaciones de las diferentes densidades mostradas en la Tabla No. 1. Se utiliza un tanque que contiene un fluido de densidad conocida, y las piezas se dejan flotar. Los polímeros que presenten pesos moleculares mayores a los del fluido utilizado se hundirán y los fluidos de densidad menor a la del fluido flotarán. El PP es uno de los polímeros que presenta una menor densidad, por lo tanto flotarás en el medio. Es recomendable que la densidad del fluido a utilizar tenga una densidad intermedia entre los polímeros que se desean clasificar (Pascoe, 2000) (ACOR, 2003).

Por sus propiedades y su bajo costo el fluido más utilizado para lograr la separación de los polímeros es el agua. También es recomendable agregar un poco de detergente para reducir la tensión superficial y mejorar el proceso de separación (Pascoe, 2000) (ACOR, 2003).

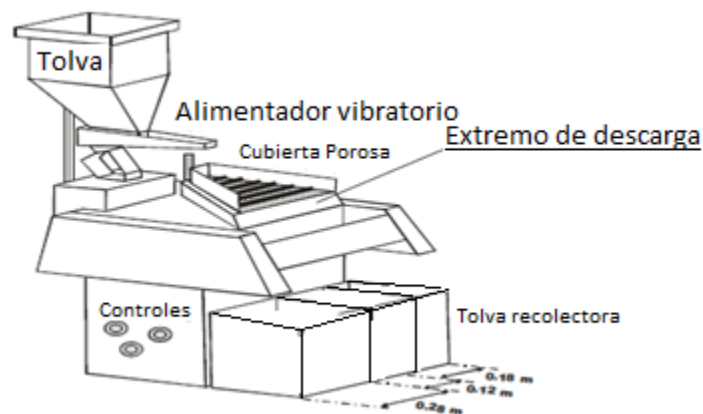
Cuando la densidad de los polímeros es menor a la del fluido, como es el caso del PP es recomendable utilizar diluciones con etanol o metanol. En la práctica se experimentan separaciones lentas, difíciles de controlar. La separación es dificultosa si las densidades de los polímeros a separar son bajas. Es importante que el tamaño de las partículas sea homogéneo en la mezcla, debido a que estas se ven afectadas por la gravedad. También se debe tomar en cuenta la temperatura del sistema, ya que la densidad del fluido es dependiente de la temperatura y la eficiencia de la separación también se va ver afectada por cambios de temperatura en el ambiente. (VERC, 2005)

Otra forma de realizar la separación por densidad es por medio de ciclones, hidrociclones y centrifugas. En este proceso ya no hay una dependencia del tamaño de partícula ni de la

geometría, sin embargo, se tiene un incremento en el costo debido a la inversión en el equipo (VERC, 2005) (Pascoe, 2000) (Tall, 2000).

3) **Mesas de aire para separación de PP/PVC (Air Tabling):** La mesa de aire se compone principalmente de una tolva, un alimentador vibratorio y una mesa provista de agujeros, accionado por un motor excéntrico para impartir la vibración longitudinal. El diámetro de los agujeros de la mesa debe ser menor al diámetro de partícula más pequeño en la mezcla. También posee un ventilador eléctrico situado debajo de la mesa con agujeros, para generar el flujo de aire hacia arriba como se muestra en la Figura No. 5. Un depósito está colocado junto al extremo de descarga con divisiones para separar partículas de baja densidad y partículas de alta densidad (Doddiba, 2006).

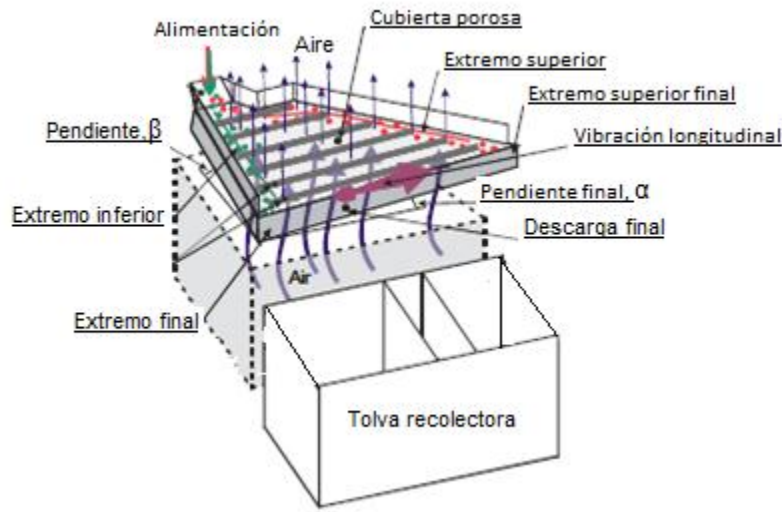
Figura No. 5: Mesa de aire para separar PP de PVC



(Doddiba, 2006)

Al comenzar la alimentación la mesa es movilizada con el movimiento longitudinal para crear una cama uniforme del material. Luego el ventilador es encendido para que las partículas de baja densidad queden suspendidas en el aire y las partículas de mayor densidad quedan en la mesa. Luego la mesa es accionada de nuevo con el movimiento vibratorio longitudinal para que las partículas de alta densidad se movilicen a la zona de alta densidad como se muestra en la Figura No. 6. Las partículas de baja densidad que están fluidizadas se movilizan por el extremo de la zona de baja densidad. Al finalizar el proceso se tendrá en los depósitos los polímeros ya separados en su respectivo colector (Doddiba, 2006)

Figura No. 6: Funcionamiento de la mesa de aire para separar la mezcla de PP/PVC



(Dodbiba, 2006)

b. **Reducción de tamaño (Molienda):** Si el proceso de reciclaje se alimenta con recipientes de batería para automóviles, piezas moldeadas de la industria automotriz, recipientes rígidos en general, tejidos o películas (films) el primer paso es la reducción de tamaño. Frecuentemente los recipientes de baterías para automóviles son convertidos en trocitos o "chips" de resina, para luego ser transportados y reciclados (Rader *et al*, 1995).

Los molinos para la reducción deben ser molinos rotatorios con una gran cavidad para extraer material en la cámara de corte y deben cortar rápidamente el material rígido de PP en pequeños gránulos, que puedan pasar a través de un tamiz de aproximadamente 1.26 cm ($\frac{1}{2}$ " de diámetro. Por otro lado, los molinos para materiales de tejidos o películas de PP deben tener un diseño semi-cerrado con más hojas y una colocación escalonada para proporcionar una acción de corte menos agresiva. Se debe trabajar el molino a velocidades reducidas para evitar que el exceso de calor se acumule, a su vez, reduce el ruido que pueda causar. El enfriamiento se produce al extraer el aire caliente a través de la cámara de corte por medio de un ventilador en la línea de descarga. El polipropileno extruido o fibras de tela es difícil de moler, y los molinos para este tipo de productos debe tener una gran potencia y una refrigeración adecuada. Por lo general las cuchillas del molino se necesitan cambiar cada cinco días dependiendo del producto que se alimente, y dependiendo de las impurezas que traiga el plástico (Rader *et al*, 1995).

Los molinos deben ser diseñados para generar un ruido aceptable, se puede adecuar el cuarto de reducción con una instalación acústica que reduzca el ruido. Generalmente se coloca un detector de metales en la alimentación para evitar que partículas metálicas sean introducidas por equivocación. También es conveniente en algunos casos tener un molino y un molino más

pequeño proporciona un mejor rendimiento que tener únicamente un molino de gran capacidad trabajando (Raderet *al*, 1995).

c. **Lavado y secado:** Por lo general los productos de PP no vienen con muchos contaminantes, por lo tanto, si el PP es excepcionalmente limpio y libre de papel, adhesivos, etiquetas u otros contaminantes únicamente se debe lavar y enjuagar. Durante el lavado de las hojuelas el agua es removida entre las etapas. Esto puede realizarse con un agitador de masas que deja de un 20 a 30% de humedad. Sin embargo, después de la última etapa del lavado, se debe estar seguro de que las hojuelas sean secados hasta un 0.5% de humedad como máximo, antes de alimentar a un extrusor (Rader *et al*, 1995).

Existen secadores especiales, cilíndricos, que son una combinación de la aplicación centrífuga y una corriente de aire caliente. En estos secadores el PP húmedo suspendido es introducido a la parte inferior del cilindro donde entra en contacto con un rotor de paletas. La resina se lanza contra una pantalla perforada que permite que la mayor parte del agua pase a través, y al mismo tiempo el polímero se mueve hacia arriba de la secadora. El aire caliente se introduce en la parte superior del secador y fluye a contra corriente de las hojuelas de PP. Este tipo de secador seca aproximadamente entre 0.3-0.6% de humedad dejándolos listos para la alimentación a la extrusora. Se debe tener un control en la temperatura del aire caliente y la temperatura del PP para evitar que el PP sea derretido (Rader *et al*, 1995).

d. **Extrusión:** Ya que se tiene las hojuelas limpias estos sirven de alimento en una extrusora. Estas se funden aproximadamente a 240°C y es cortado con un cortador de matriz para formar gránulos adecuados (Pellets). En esta etapa la calidad del producto puede ser monitoreado antes de su empaque (Recoup, 2005).

Los parámetros importantes al obtener los gránulos uniformes (Pellets) son determinados por la aplicación que se le va dar al material recuperado, sin embargo, el requisito más importante es el índice de flujo de fusión (MFI), que determina la resistencia a la fusión y se indica si es probable que las propiedades del pellet, sea o no adecuado para su posterior uso en productos de valor (Recoup, 2005).

Extrusores convencionales de un solo tornillo son capaces de manejar las hojuelas de PP a partir de recipientes de batería para automóviles, piezas moldeadas de la industria automotriz, recipientes rígidos en general. Las tolvas de alimentación pueden ser acopladas a puentes automatizadas, y el extrusor normalmente tiene una sección de ventilación para liberar humedad acumulada o compuestos volátiles residuales. Se han desarrollado extrusoras con un tornillo de diámetro más grande en la sección de alimentación, esto se ha utilizado para resolver el problema

de la alimentación adecuándolo a una velocidad estable para que coincida con la capacidad de salida del tornillo (Rader *et al*, 1995).

Como se mencionó anteriormente la extrusora debe tener un barril de ventilación para eliminar cualquier tipo de humedad o compuestos volátiles. El ducto de ventilación debe estar recubierto de algún material protector, esto para proteger al operador en las proximidades de cualquier liberación repentina de gas o polímero. La combinación de la alimentación, ventilación y el logro de una presión de descarga adecuada para la fusión de filtración a menudo resulta en un diseño de tornillo con una relación de 30-35 L/D (Rader *et al*, 1995).

e. **Elaboración de producto final:** Los productos finales del reciclaje de polipropileno tienen la ventaja que no necesitan tener una alta calidad. En el mercado guatemalteco la mayor parte del PP reciclado se queda en pellets, que es el paso donde se termina el proceso de reciclaje mecánico en la extrusión. (CGP + L)

2. **Reciclaje químico (Ternario):** El reciclaje químico tiene por objeto realizar una descomposición química del polipropileno para poder recuperar los monómeros del polímero. Estos se pueden reutilizar como materia prima para la polimerización de nuevos compuestos. (Y.-H. Lin *et. al.*, 2005).

Uno de los métodos más atractivos para el reciclaje químico del PP es la pirolisis que consiste en el craqueo térmico del polímero para obtener material de bajo peso molecular. Esta técnica tiene la desventaja de que proporciona una amplia gama de productos y requiere altas temperaturas aproximadamente de 500 a 900°C e incluso mayores (Y.-H. Lin *et. al.*, 2005).

Actualmente para mejorar las condiciones mencionadas anteriormente se utilizan catalizadores para mejorar la velocidad de degradación y disminuir la temperatura de descomposición, sin embargo, la pirolisis catalítica se encuentra en estudios. Este proceso busca mejorar la eficiencia de reciclaje química del PP y resolver los problemas de los desperdicios plásticos. Se ha llevado a cabo teniendo en cuenta una variedad de catalizadores y se ha hecho poco énfasis en el diseño de los reactores. Los reactores que se han utilizado, son reactores adiabáticos por lotes y reactores de lecho fijo. Estos han mostrado problemas de obstrucción y dificultad en la obtención de un contacto íntimo o un área aceptable que favorezca la degradación del polímero. Estos reactores muestran una gran acumulación u obstrucción, por lo tanto, únicamente se obtiene grandes cantidades de residuos y al aplicarlo a escala industrial un gasto desfavorable. (Y.-H. Lin *et. al.*, 2005).

Otra opción es un reactor con lecho fluidizado. Éste se ha utilizado para la obtención de hidrocarburos a partir de la degradación catalítica del PP. Este tipo de reactor muestra mejores rendimientos en el “crackeo” que los reactores mencionados anteriormente, debido a que no

presenta complicaciones de obstrucción y favorece la degradación por medio de catalizadores. (Y.-H. Lin *et. al.*, 2005).

3. Como fuente de energía (Cuaternario): Al utilizar desechos plásticos en sustitución parcial del carbón, da como resultado un incremento en el poder calorífico del alimento de combustible y disminuye la emisión de dióxido de carbono, metales pesados, dióxidos de azufre y cenizas. Los desechos plásticos más adecuados para ser utilizados como combustibles en cementeras y centrales térmicas son las películas agrícolas y ciertos residuos plásticos comerciales e industriales. Los polímeros que han sido agredidos por el aire y el sol son considerados los más adecuados para realizar su recuperación energética. (Aracil, 2008)

Se debe regular la cantidad de residuos de PVC en un porcentaje menor del 2-3%, debido al potencial de corrosión del equipo por la formación de ácido clorhídrico (HCl). Todo proceso de recuperación energética por medio de combustión genera contaminantes que han de ser adecuadamente tratados para evitar su descarga al medio ambiente. (Aracil, 2008)

a. Poder calorífico:

Poder calorífico superior: Es la energía liberada por la combustión con la suposición de que todos los elementos de la combustión siendo estos el combustible y el aire son tomados a 0°C y los productos que serían los gases de combustión son llevados también a 0°C después de la combustión. En consecuencia de esto provoca una condensación del vapor de agua; este vapor de agua proviene de la humedad propia del combustible y el agua que se forma debido al contenido de hidrogeno en el combustible. Por lo tanto, al condensar el vapor de agua contenido en los gases de combustión se evidencia un aporte de calor dando como resultado un poder calorífico superior. (Fernández, 2006)

Poder calorífico inferior: Para obtener el poder calorífico inferior no se considera la condensación del vapor de agua contenido en los gases, por lo tanto, no hay un aporte de energía adicional de calor y solo se dispondrá del calor proveniente de la oxidación del combustible. (Fernández, 2006)

Los plásticos tienen un alto contenido energético debido a su procedencia, el polipropileno tiene un poder calorífico de 40 kJ/g parecido al de la gasolina y superior al de un combustible alternativo como el etanol (Tabla No.3), debido a su contenido energético también es una opción como fuente de energía (Arandes *et. al.*, 2004).

Tabla No. 3. Poder calorífico de la gasolina y el etanol:

Gasolina 95	Etanol
43.53 kJ/g	26.81 kJ/g
0.74 kg/L	0.794 kg/L
32.21 MJ/L	21.28 MJ/L

(Hernández, 2010)

Tabla No. 4. Poder calorífico de diversos polímeros:

	Polímero	Bomba calorimétrica aproximado (kJ/g)	Contribución aproximada (kJ/g)	Bomba calorimétrica Neta (kJ/g)	Consumo de oxígeno neto (kJ/g)
1	Polioximetileno	17.39	18.20	15.93	13.97
2	Politetrafluoroetileno	6.68	7.57	6.68	8.38
3	Alcohol Polivinílico	23.31	26.20	21.31	23.82
4	Polietileno	47.74	46.00	44.60	44.91
5	Polidimetilsiloxano	19.53	N/A	17.75	16.99
6	Polipropileno	45.80	46.00	42.66	44.91

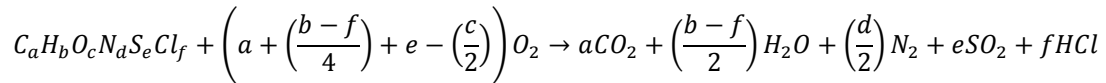
(Hackett *et. al*, 2010)

Se observa que el poder calorífico neto para el polipropileno (PP) es de 42.66 kJ/g. Este valor es obtenido de un estudio del poder calorífico en diversos polímeros realizado en la Universidad de Standfor. (Hackett *et. al*, 2010)

b. **Combustión:** La combustión se considera una reacción exotérmica. Se hace reaccionar un material con oxígeno a altas temperaturas para liberar energía química del combustible en forma de calor. Se puede utilizar el término incineración para referirse a la combustión de residuos. El objetivo de la incineración es la destrucción de los residuos orgánicos y la tendencia actual es que se realice la recuperación energética, a este proceso se le conoce como valorización energética. (Aracil, 2008)

El oxígeno marca la diferencia entre la pirolisis y la combustión, por lo que la concentración de oxígeno es la principal variable en la combustión. En la combustión el oxígeno puede reaccionar en dos zonas, si se generan grandes cantidades de volátiles se produce la combustión de los gases de pirolisis que al quemarse forman la llama (hollín incandescente); si el oxígeno alcanza la zona del sólido, debido a que no se genera mucho material volátil o debido al exceso de oxígeno, se produce la combustión del sólido. (Aracil, 2008)

La ecuación general de la combustión se puede considerar como:



(Aracil, 2008)

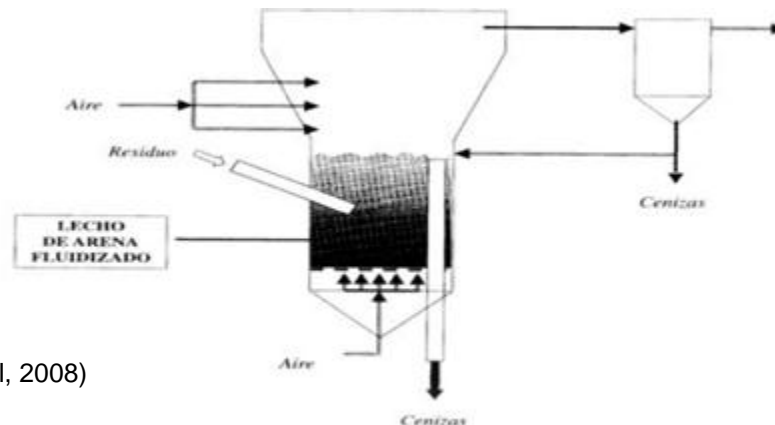
Fuera de la teoría, la combustión nunca va a ser completa al cien por ciento y existe la posibilidad de generación de otros compuestos como monóxidos de carbono que son el resultado de una combustión incompleta. La composición típica del gas en un proceso de incineración puede ser la siguiente: O_2 (6 – 15%), H_2O (8 – 20%), CO_2 (5 – 10%), CO (100 – 200 ppm), HCl (10 – 1500 ppm), Cl_2 (5 – 50 ppm) (Aracil, 2008)

Las condiciones bajo las que se realiza la combustión han de estar muy controladas debido a las diferentes composiciones de aditivos incorporados a los plásticos, metales pesados como plomo, cadmio, cobre, etc., que son tóxicos en general. Por otra parte, la presencia de PVC en la mezcla de plásticos post-consumo, aporta a los gases de combustión ácido clorhídrico que en presencia de materia orgánica puede originar productos tóxicos derivados de las dioxinas y de los dibenzofuranos. Para que esto no ocurra, basta con controlar la temperatura durante el proceso de combustión, pues a temperaturas superiores a 600 °C no se producen este tipo de compuestos orgánicos. La incineración suele realizarse a temperaturas de 1200 °C. (Aracil, 2008)

c. Cámara de combustión:

Horno de lecho fluidizado: Permite un contacto eficaz entre los residuos y el aire (oxígeno) para la combustión. Permite trabajar a temperaturas más bajas con tiempos de residencia de sólidos menores y no tener que forzar el exceso de aire para asegurar la combustión completa de los residuos. La principal limitación es el ajuste del tamaño de partícula de los sólidos debido a la fluidización que oscila entre 0.3 y 1.5 mm. En la Figura No. 7 se muestra un ejemplo de la cámara de combustión. (Aracil, 2008)

Figura No. 7: Cámara de combustión de lecho fluidizado para residuos sólidos



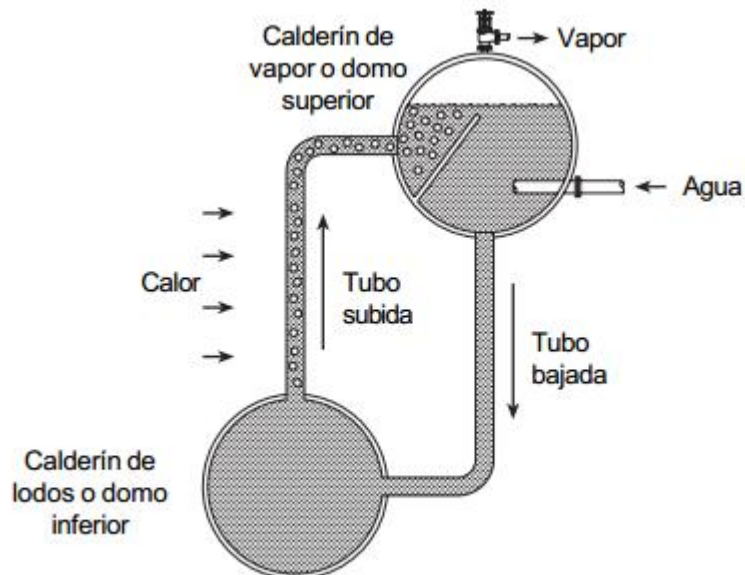
(Aracil, 2008)

Se utilizan alimentadores auxiliares de combustible para asegurar los requerimientos de temperatura en el proceso, es de suma importancia en la puesta en marcha y en el caso que los residuos presenten un poder calorífico bajo.

d. **Caldera acuotubular:** Las calderas acuotubulares se diferencian de las calderas pirotubulares en que el agua circula dentro de los tubos con la fuente de calor rodeándolos. Este arreglo permite presiones más altas ya que el diámetro del tubo es significativamente más pequeño que el cuerpo de la caldera pirotubular. (Spirax Sarco, 2004)

Solo es adecuado utilizar una caldera acuotubular si se requiere más de 27,000 kg de vapor /h o presiones superiores a los 27 bar y temperaturas superiores a los 340°C. Estas calderas trabajan bajo el principio de circulación de agua. El agua de alimentación fría se introduce en el calderín de vapor y baja por el tubo de bajada hasta el calderín de lodos, debido a que tiene una densidad superior a la del agua caliente. Su densidad disminuye cuando pasa por el tubo de subida donde se calienta formando burbujas de vapor. El agua caliente y las burbujas de vapor pasan al calderín de vapor. Cuando la presión en la caldera aumenta se reduce la diferencia de densidad del agua y el vapor saturado, esto da como resultado una reducción en la circulación. Para mantener el rendimiento de vapor según aumenta la demanda de presión, debe aumentarse la distancia entre el calderín más bajo y el calderín de vapor. A continuación se muestra en la Figura No. 8 un esquema de una caldera acuotubular. (Spirax Sarco, 2004)

Figura No. 8: Esquema general de una caldera acuotubular



(Spirax Sarco, 2004)

e. **Turbina de vapor:** Se alimenta con vapor a una temperatura y presión determinada dependiendo los requerimientos del proceso y la capacidad de la turbina. Este vapor hace girar unos álabes unidos a un eje rotatorio, a la salida de la turbina, el vapor que ha sido introducido tiene una presión y una temperatura menor que el inicial. Parte de la energía perdida por el vapor se emplea en mover el eje rotatorio. Necesita también de unos equipos auxiliares como un sistema de lubricación, un sistema de refrigeración, cojinetes de fricción y un sistema de regulación y control. (Opex Energy, 2009)

Las consideraciones principales para hacer uso de una turbina de vapor es: Utilizar un vapor de las características fisicoquímicas apropiadas (presión y temperatura). Respetar las instrucciones de operación en arranques, durante la marcha y durante las paradas del equipo. Respetar las consignas de protección del equipo, y si da algún indicio de mal funcionamiento (vibraciones, temperaturas elevadas, falta de potencia) parar y revisar el equipo, nunca sobrepasar los límites del equipo. Realizar un mantenimiento apropiado al equipo. (Opex Energy, 2009)

Clasificación de las turbinas:

Según el número de etapas:

- Monoetapas: son turbinas que se utilizan para pequeñas y medianas potencias.
- Multietapas: aquellas en las que la demanda de potencia es muy elevada y se requiere rendimientos altos. (Opex Energy, 2009)

Según la presión del vapor de salida:

- Contrapresión: el vapor de salida es utilizado posteriormente en el proceso.
- Escape libre: el vapor de salida va hacia la atmósfera. No aprovecha la energía ya que no es aprovechado el vapor de salida en otros procesos (calentamiento).
- Condensación: el vapor de salida es condensado con agua de refrigeración. (Opex Energy, 2009)

Según la manera en que transforma la energía térmica en mecánica:

- Turbina de acción: cambia la energía térmica en mecánica únicamente en los alabes fijos.
- Turbina de reacción: realiza la transformación simultáneamente en los alabes fijos y móviles. (Opex Energy, 2009)

f. **Tratamiento de los gases de combustión:** Los gases de combustión también llamados gases de chimenea, incluso en una combustión eficiente en incineradores, pueden estar contaminados de cenizas volantes, compuestos gaseosos como SO_2 , NO_x , etc. Compuestos de metales pesados y productos de combustión incompleta como PACs, dioxinas y furanos, etc. Debido a esto los sistemas de lavado de gases deben contemplar varios factores de eliminación con el fin de cumplir con las regulaciones establecidas para los límites de emisiones. (Aracil, 2008)

Eliminación de gases ácidos y partículas: No existe una solución única ya que depende de las características específicas de la planta, el tipo de residuo y las condiciones de operación. Existen tres sistemas básicos de depuración, los cuales son: sistema seco, sistema semi-seco y sistema húmedo. (Aracil, 2008)

Sistema seco: Este tipo de tratamiento evita la producción de aguas residuales, pero el volumen de residuos sólidos resulta mayor, ya que al eliminar los gases ácidos por dicho sistema se trabaja con una mayor cantidad de reactivo y la eficiencia suele ser menor que por un sistema húmedo. El proceso consiste en la eliminación de los gases ácidos por medio de una reacción con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o carbonato de calcio (CaCO_3) el cual es inyectado en polvo. Luego las partículas y residuos de cenizas volantes se retienen por medio de un filtro o un sistema de captación de partículas que opera por vía seca. (Aracil, 2008)

Sistema semi-seco: Por medio de una lechada de cal al 15-20% se hace reaccionar con el gas que contiene partículas sólidas en un reactor. Es inyectado en forma de microgotas por medio de la atomización de la lechada de cal. El agua es evaporada lo que ayuda al enfriamiento de los gases de chimenea y los contaminantes son capturados en partículas de polvo seco que pueden captarse con un filtro. El consumo de cal es inferior que en los sistemas secos y no hay residuos líquidos. (Aracil, 2008)

Sistema húmedo: Consta con un colector de partículas húmedas de tipo venturi o cámara de rociado. Esto provoca una disminución en el pH de los gases para luego hacerlos pasar por una torre de absorción, en la que se hace circular agua a contracorriente o una solución alcalina. El empleo de una solución alcalina es preferible si las concentraciones de los gases ácidos son mayores o si existe cloro presente (Cl_2). Si los gases se encuentran contaminados con mercurio (Hg) es preferible utilizar agua, por otro lado la retención de SO_2 se puede llevar a cabo en la misma torre de absorción, en cuyo caso se utiliza torres de platos y disoluciones de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). (Aracil, 2008)

Eliminación de óxidos de nitrógeno: Existen dos métodos de tratamiento de gases que son los más utilizados y ambos se basan en el empleo de amoníaco (NH_3) para la reducción de los NO_x a N_2 y agua (H_2O). (Aracil, 2008)

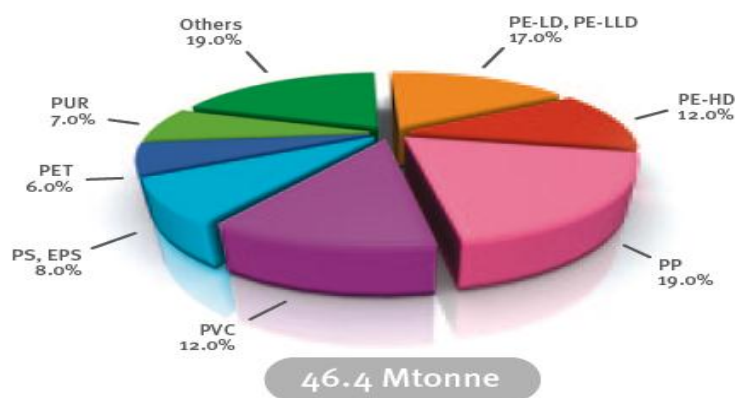
Reducción selectiva no catalítica: Se realiza una inyección de amoníaco (NH_3) en la cámara secundaria de combustión a temperaturas entre 750-950°C. La eficiencia que se consigue es del 90% e inhibe la formación de dioxinas, aunque presenta los inconvenientes de un alto exceso de amoníaco requerido y la posible presencia de compuestos amoniacales en el residuo final. (Aracil, 2008)

Reducción selectiva catalítica: Los gases de combustión se hacen reaccionar con un catalizador sólido de óxidos metálicos (TiO_2 , V_2O_5 , WO_3) en un rango de temperaturas más bajo de temperatura 200- 300 °C y se realiza la inyección del amoníaco (NH_3) en la salida de los gases en conjunto con el catalizador. Sin embargo, se requiere que los gases lleguen libres de metales pesados antes del tratamiento catalítico. (Aracil, 2008)

E. Demanda de polipropileno a nivel internacional:

La demanda de Polipropileno en Europa representa el 19% de la demanda total de plásticos. Los 3 tipos de resinas mejor posicionadas en el mercado son el polietileno (29%), el polipropileno (19%) y el cloruro de polivinilo (12%). En el 2010 la demanda de termoplásticos como PE, PP, PVC, PS y PET aumentó entre 1.4% y 8%. Se espera que la tendencia sea de un incremento del 5% por año en la demanda de resinas. En la Figura 7 se muestra la distribución de la demanda en función de los diferentes plásticos en Europa (EuPC *et al*, 2011).

Gráfica No. 1. Representación gráfica de la demanda de plásticos en Europa



(EuPC *et al*, 2011)

Según un estudio realizado por una empresa alemana CERESANA, determinó que la demanda mundial de polipropileno aumento en aproximadamente un 7% en el 2009. El estudio indica que para el 2010 el consumo de polipropileno siguió la misma tendencia y se incrementó aproximadamente un 7%. (CERESANA, 2011)

Existen numerosos obstáculos y desafíos por delante para el reciclaje del PP. Sin embargo, cada vez más hay indicios de que podría llegar a ser uno de las resinas post-consumo de mayor

importancia en la industria del reprocesado de plástico. Por ejemplo durante los últimos tres años desde el 2010, KW Plastics Recycling tiene comprado más de 28 millones de libras, únicamente de PP post-consumo, distribuidos de la siguiente manera: 4.1 millones en el 2010, 9.6 millones en el 2011 y casi 14.6 millones en el 2012. Estas cantidades son significativas ya que en el pasado no existían inversiones tan grandes para un producto post-consumo de PP. Según el gerente general de KW Plastics Recycling (Scot Sounder) esperan comprar por lo menos 30 millones de libras para el 2013 (Verespej, 2013)

Entre las ventajas que posee el PP es que su forma post-consumo es muy limpia, la mayoría del PP es translucido o de color blanco. Existe un mercado para el PP que es ventajoso, en Norte América pagan US\$ 0.16 por cada libra, comparado con US\$ 0.04 por libra de plásticos mixtos. Si recolectan 40,000 libras de PP obtienen US\$6,400.00, que es significativamente apreciable en comparación de US\$1,600.00 40,000 libras de plásticos mixtos (Verespej, 2013)

La distribución de la utilización de las resinas de los diferentes polímeros en Norte América se muestra en la Figura No. 9 (Verespej, 2013).

Figura No. 9: Distribución porcentual de las resinas utilizadas en Norte América

Resinas utilizadas en Norte América en el 2011			
PP	25%	PET	7%
PVC	18%	PS	6%
HDPE	17%	ABS	4%
LLDPE	11%	PC	2%
LDPE	10%		

(Verespej, 2013)

Se puede observar que el PP es la resina con mayor porcentaje de uso, con un 25% indicando la importancia de su reciclaje. (Verespej, 2013)

F. Usos del polipropileno:

Tabla No. 5. Usos comunes de diferentes plásticos en Guatemala.

Material	Usos comunes
PET	Botellas de refrescos carbonatados, recipientes para comida.
PE-HD	Botellas de leche, botellas de detergente, productos en forma de lámina como bolsa, etc.
PVC	Recipientes domésticos y empaques de comida, tuberías, aislante de alambre y cable eléctrico.
PE-LD	Envase de película fina y envoltorios, pañuelos desechables, otros materiales de lámina, materiales para agricultura y construcción.
PP	Cajas para botellas, maletas, tapas de recipiente y etiquetas, cajas para acumuladores de automóviles, envases de comida.
PS	Vasos y platos de espuma, cubiertos desechables, artículos moldeados por inyección.
Otros	Plásticos

(CGP+L, 2004)

Como se puede observar en la Tabla No. 5, los usos más comunes en la industria guatemalteca, como producto final para comercializarse es muy diverso, ya que van desde envases de comida hasta cajas para baterías de automóviles. Existen más de 3,000 productos del cual se utilizan plásticos y de estos solamente es posible reutilizar los plásticos más comunes como los enlistados en la Tabla No.2 (CGP+L, 2004).

En la Industria automotriz es muy utilizado el polipropileno, los usos típicos que se le dan es en el revestimiento de guardabarros, pedales de acelerador, clutch y freno, guarniciones interiores, paneles de puertas, timones, refuerzos de ventilador, entradas de aire fresco al automóvil y guarniciones de bóveda del tablero. También en los espaldares de asientos, cubiertas de guarda llantas, caja de fusibles, conexiones eléctricas, cajas de baterías y cubiertas de luces interiores (Gómez *et. al.*, 2001).

La ventajas del polipropileno son su bajo costo, capacidad de colorearse, baja fricción y su resistencia al calor (Gómez *et. al.*, 2001).

V. Antecedentes

A. Desechos sólidos en Guatemala

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), la producción total de residuos sólidos en la república de Guatemala es de 1, 746,059 toneladas para el año 2009. A continuación se muestra la distribución de los residuos sólidos por departamento en el año 2009. (INE, 2010)

Tabla No. 6. Distribución de los residuos sólidos en la República de Guatemala para el año 2009:

Departamento	Cantidad de desecho (Toneladas)
Total	1,746,059
Guatemala	445,242
El Progreso	19,020
Sacatepéquez	18,830
Chimaltenango	80,304
Escuintla	93,008
Santa Rosa	41,539
Sololá	46,528
Totonicapán	62,089
Quetzaltenango	85,367
Suchitepéquez	68,307
Retalhuleu	40,333
San Marcos	134,925
Huehuetenango	95,077
Quiché	113,795
Baja Verapaz	29,179
Alta Verapaz	118,376
Petén	32,240
Izabal	50,250
Zacapa	29,925
Chiquimula	49,269
Jalapa	38,549
Jutiapa	53,908

(INE, 2010)

B. Situación del reciclaje en Guatemala:

Según una entrevista realizada al Director de la empresa Plásticos del Pacífico (MBA Romano Giovanni Dallamora), comenta que existe una coacción ambiental por parte de Europa y de Estados Unidos, sin embargo, en Guatemala todavía no se ha logrado una cultura a favor del reciclaje, las personas no se encuentran capacitadas ni sensibilizadas. No existe una responsabilidad ambientalista por parte de los guatemaltecos. Indica que se puede apreciar una relación entre el incremento del precio de las resinas y el aumento de la demanda, lo cual es un aspecto favorable para la industria del plástico en Guatemala. Al comparar los niveles del reciclaje de plástico en Guatemala con otros países no se llega ni al 5% de lo que se produce. Debido a esto se puede ver que en lo que es reciclaje no está bien. En Guatemala la mayor cantidad que se recicla son desperdicios de lo que se producen en fábricas, post industrial, y el PET que ya tiene un sistema informal de acopio (Ingeniería Plástica, 2006).

C. Problemática ambiental de la utilización de plásticos:

El rápido crecimiento y la alta tasa de inflación del mercado, han creado una cultura de consumo masivo, al utilizar y desechar todo tipo de productos que se adquieren en los supermercados y tiendas de conveniencia. La mayoría de estos artículos de utilizar y desechar en un porcentaje apreciable son plásticos de los cuales se convierten en una problemática en los vertederos y cuerpos receptores de la ciudad. La problemática radica en que estos plásticos que se utilizan y desechan constituyen más de un tercio de la basura no biodegradable y por lo tanto implica mayores volúmenes de basura a transportar, implica la posibilidad de estancamiento de desagües municipales y por ende un mayor costo para la municipalidad dependiendo la región de la ciudad (CGP+L, 2004).

Esta cultura de utilizar y desechar reactiva el consumismo y por ende la demanda y la producción de plásticos en general. Esto provoca que la industria produzca una mayor cantidad de plásticos; el plástico proviene de monómeros obtenidos del petróleo como es el caso del polipropileno que es la polimerización de monómeros de propileno y etileno. En la obtención de estos monómeros se produce CO₂ que es uno de los principales gases de efecto invernadero. De igual manera la industria del sector de plásticos en Guatemala causa impactos en los cuerpos receptores que se muestra a continuación en la Tabla No.7, indicando valores de DQO y DBO al día. (CGP+L, 2004) (Gómez *et. al.*, 2001) (MARN, 2009).

Tabla No.7. Valores promedio de descarga de DQO y DBO según el tipo de industria en Guatemala

Valores promedio de descargas a cuerpos receptores por tipo de industria			
Industria	DQO (kg/día)	DBO (kg/día)	Fosforo total (mg/L)
Alimentos	155.14	70.34	10.92
Bebidas	800.70	638.66	22.82
Productos Cárnicos	341.55	148.76	49.02
Inmuebles	44.84	62.63	8.23
Lácteos	6,571.50	4,903.90	108.60
Metales	51.65	18.87	6.01
Minerales	119.20	66.20	25.55
Plásticos	20.58	8.78	5.95
Químicos	12.09	3.61	12.02
Textiles	77.73	1,124.4	10.86

(MARN, 2009)

Como se mencionó anteriormente los plásticos no son biodegradables, esto significa que las características los hacen que sean resistentes a los cambios químicos y biológicos a través del tiempo, por lo tanto, no se oxidan ni se descomponen al ser depositados en un vertedero (CGP+L, 2004).

Otra problemática a considerar es que en los vertederos municipales no hay una clasificación de los residuos, por lo tanto, hay una acumulación de los residuos con otros sólidos que con el tiempo no son tratados y dañan el medio ambiente. A continuación en la Tabla No.8 se muestra una clasificación, según la ciudad y el tipo de residuo (CGP+L, 2004) (URL, 2009).

Tabla No.8. Composición generalizada de la basura según el país o ciudad.

País/Ciudad	Tipos de Residuo						
	Cartón y Papel (%)	Metal (%)	Vidrio (%)	Textiles (%)	Plásticos (%)	Orgánicos putrescibles (%)	Otros e inerte (%)
Asunción	10.20	1.30	3.50	1.20	4.20	58.20	19.90
Barbados	20.00	9.00	59.00	12.00
Belice	5.00	5.00	5.00	...	5.00	60.00	20.00
Caracas	22.30	2.90	4.50	4.10	11.70	41.30	11.20
Costa Rica	20.70	2.10	2.30	4.10	17.70	49.80	3.30
Ecuador	9.60	0.70	3.70	...	4.50	71.40	...
Guatemala	18.00	4.00	5.00	5.00	13.00	44.00	11.00
México D.F.	20.90	3.10	7.60	4.50	8.40	44.00	11.50
Perú	7.50	2.30	3.40	1.50	4.30	54.50	25.90

(URL, 2009)

D. Regulaciones ambientales

Según la ley de protección y mejoramiento del medio ambiente, decreto 68-86 en su artículo No.13 para la protección de la atmósfera establece que actualmente en Guatemala no se cuenta con normas técnicas específicas que regulen las emisiones de gases y la calidad de aire. Lo más cercano es el instrumento jurídico que contenía los parámetros de control de emisiones de

vehículos, siendo este el Acuerdo Gubernativo 19-97, sin embargo, fue derogado por lo tanto se pueden utilizar parámetros internacionales como se muestra en la Tabla No.9 Sobre los valores límites de emisiones a la atmósfera para instalaciones de incineración de residuos según la Unión Europea (PNUMA, 2000) (Aracil, 2008)

Tabla No.9. Valores límite de emisiones a la atmósfera para la incineración de residuos según la UE.

Contaminante	Límite (mg/Nm ³)	Contaminante	Límite (mg/Nm ³)
Partículas totales ⁽¹⁾	10	CO ⁽¹⁾	50
Carbón orgánico total ⁽¹⁾	10	Cd + Tl ⁽²⁾	0.05
HCl ⁽¹⁾	10	Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Va (total) ⁽²⁾	0.05
HF ⁽¹⁾	1	PCDD/F ⁽³⁾	0.1
SO ₂ ⁽¹⁾	50	Hg ⁽²⁾	0.05
NO _x ⁽¹⁾	200*- 400**		

(1)Valores medidos diarios

(2) Valores medidos en un periodo de 30min-8h

(3)Valores medidos en un periodo de 6-8h

*Para instalaciones existentes con capacidad nominal de menor a 6 ton/h o para instalaciones nuevas

**Para instalaciones existentes con capacidad nominal menor a 6 ton/h

(Aracil, 2008)

E. Precio de la resina y energía eléctrica en Guatemala:

Tabla No.10. Precio de la resina de polipropileno y la energía eléctrica en Guatemala:

Energía Eléctrica	Q1.60/ kWh
Resina de PP procesada*	Q4.10/ kg de PP
Resina de PP sin procesar	Q2.42/ kg de PP

(CNEE, 2010)(Banco de Guatemala, 2013)

El precio de la resina de PP sin procesar se refiere al polipropileno que no se ha clasificado por colores ni ha llevado un proceso de limpieza. En cambio sí ha pasado por un proceso de limpieza y clasificación de color posee un mayor valor, por lo que se refiere a la resina de PP procesada.

F. Aplicaciones de reciclaje de polipropileno:

1. Desde 1991, Volkswagen ha reciclado sus parachoques hechos de polipropileno. Poseen un proveedor que recupera el material y lo devuelve al ciclo de fabricación; al ser devuelto a la fábrica es sometido a un proceso de reciclaje mecánico donde básicamente se realiza la reducción, lavado, secado. Luego se mezcla con la materia prima virgen (PP) y se genera el mismo producto. Según estudios de la empresa las propiedades de los parachoques son tan buenos como los obtenidos usando únicamente material virgen (PP), sin embargo, en las pruebas muestra que hay

una diferencia significativa en las propiedades hasta que el material ha sido fundido y extruido ocho veces (Raderet *al*, 1995).

2. En el Reino Unido, se recicla el polipropileno a partir de cajas, bandejas y recipientes de acumuladores (baterías de automóviles) (Recoup, 2005).

3. En EE.UU. la empresa Wellmark Inc. donde reciclan los tubos de teñir de PP, el material recuperado lo reutilizan para accesorios de automóviles y muebles para el hogar. (Recoup, 2005).

4. En Australia la empresa Montell demostró los beneficios ambientales en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en la producción de PP virgen. Se elaboran una amplia gama de macetas que contienen un 75% de PP reciclado. (Recoup, 2005).

VI. Metodología

A. Consulta bibliográfica y planificación del trabajo de graduación (Etapa preliminar):

1. Se tuvo una revisión bibliográfica en libros e internet para obtener los conocimientos básicos referentes al polipropileno. También se obtuvo información sobre la situación actual de los desechos plásticos y de los desechos de polipropileno.
2. Se realizó la definición de los objetivos generales y específicos para delimitar el alcance del trabajo de graduación.
3. Se investigó sobre la recuperación energética para realizar una comparación con otros procesos de reciclaje de polipropileno.

B. Etapa experimental del trabajo de graduación:

1. Definición de muestras:

Polipropileno doméstico: El presente trabajo hace referencia al término de polipropileno doméstico a los recipientes rígidos que se encuentran en el hogar con la característica que son marcados con la distinción según la SPI del número 5. Sin embargo, no se tomó en cuenta materiales utilizados en construcción como marcos de puertas o ventanas, no se tomó en cuenta juguetes ni lámparas. Únicamente se tomó en cuenta materiales que son más comúnmente desechados con regularidad.

Polipropileno industrial: En este trabajo se hace referencia al término polipropileno industrial como el empaque flexible de polipropileno utilizado para el empaque de baterías. Este empaque de baterías fue ingresado en la línea de empaque, pero por problemas en la línea se dañó y fue descartado. Este empaque no llegó al consumidor por lo que no fue contaminado y solo se encuentra dañado.

2. Molienda: De acuerdo a la información recopilada se realizó una metodología para estudiar el potencial energético del polipropileno. Se tomó tres muestras parcialmente reducidas de forma manual, que consistían en productos de consumo diario, como recipientes de polipropileno, bancas de polipropileno entre otros productos (Figura No.15). Para preparar las tres muestras, estas fueron distribuidas de forma homogénea debido a la variedad de productos recolectados y contenían la misma cantidad de masa.

Se ejecutó una molienda en triplicado con cada muestra, en el molino de martillos instalado en la Universidad del Valle de Guatemala para obtener un tamaño de partícula de

Mesh 60. Se utilizó el molino de martillos debido a la disponibilidad del equipo y se hace la aclaración que este tipo de molino no es el más adecuado para realizar la molienda del polipropileno. Se busca dicho tamaño de partícula ya que el método de la determinación del poder calorífico indica que es el más adecuado. Para obtener el tamaño de partícula deseado se hizo un análisis granulométrico con la tamizadora W.S TYLER con una precisión de ± 0.001 mm obteniendo el histograma de la distribución del tamaño de partícula mostrados en la Gráfica No.2 de la sección de resultados.

3. Determinación del poder calorífico: Para la determinación del poder calorífico se utilizó una bomba calorimétrica de oxígeno, marca Parr, modelo 3694 con una precisión de ± 0.0005 Cal/g. Se utilizaron dos muestras diferentes, una de tipo industrial y otra de tipo domiciliar como se muestra en la figura No. 19 y 20 respectivamente.

La determinación del poder calorífico se hizo en triplicado con cada uno de los solventes. Se utilizó ter-butanol, 1-butanol y etilenglicol como solvente y se determinó el mejor solvente a utilizar en la estimación del poder calorífico del polipropileno. Para determinar cuál es el mejor solvente se utilizó un modelo lineal en el cual se encontró una relación entre el poder calorífico obtenido y la proporción en peso de polipropileno en la mezcla polipropileno-solvente. Dicha determinación se muestra en la sección de determinación del poder calorífico del polipropileno en el apartado del apéndice.

C. Etapa de diseño del proceso:

Para la etapa de diseño se consideró que únicamente se va a reciclar polipropileno rígido para la línea de recuperación energética.

Sin embargo, con base en las dos muestras, de la determinación del poder calorífico del polipropileno y a la información recopilada sobre la distribución y cantidad de desechos plásticos de polipropileno disponible, se realizó la propuesta de un proceso para obtener energía a partir de la combustión del polipropileno realizando el balance de masa y energía.

De acuerdo al balance de masa y energía se procedió a proponer los principales equipos utilizados en la línea de recuperación energética como se muestra en las tablas No. 17 a 19 de la sección del apéndice.

Con esta información se procedió a realizar los diagramas de entradas y salidas, Diagrama de operaciones unitarias y el balance de masa y energía general que se representa en el diagrama de flujo del proceso.

D. Comparación económica:

Se hizo una estimación de los ingresos esperados en el proceso a partir del producto final que es la energía en comparación de considerar a la resina obtenida como producto final.

Se utilizó precios encontrados en el mercado guatemalteco y se comparó la inversión inicial para cada proceso. Se estimó la inversión inicial para la línea de recuperación energética y se comparó con la inversión que se necesita en una línea de reciclaje mecánico. Finalmente se buscó referencias para estimar los costos de una línea de reciclaje mecánico y se estimó según los costos de la recuperación energética para poder hacer una comparación de las utilidades.

VII. Resultados

Gráfica No.2: Análisis granulométrico en tamizadora W.S Tyler a partir de la molienda de los desechos domésticos de polipropileno (PP).

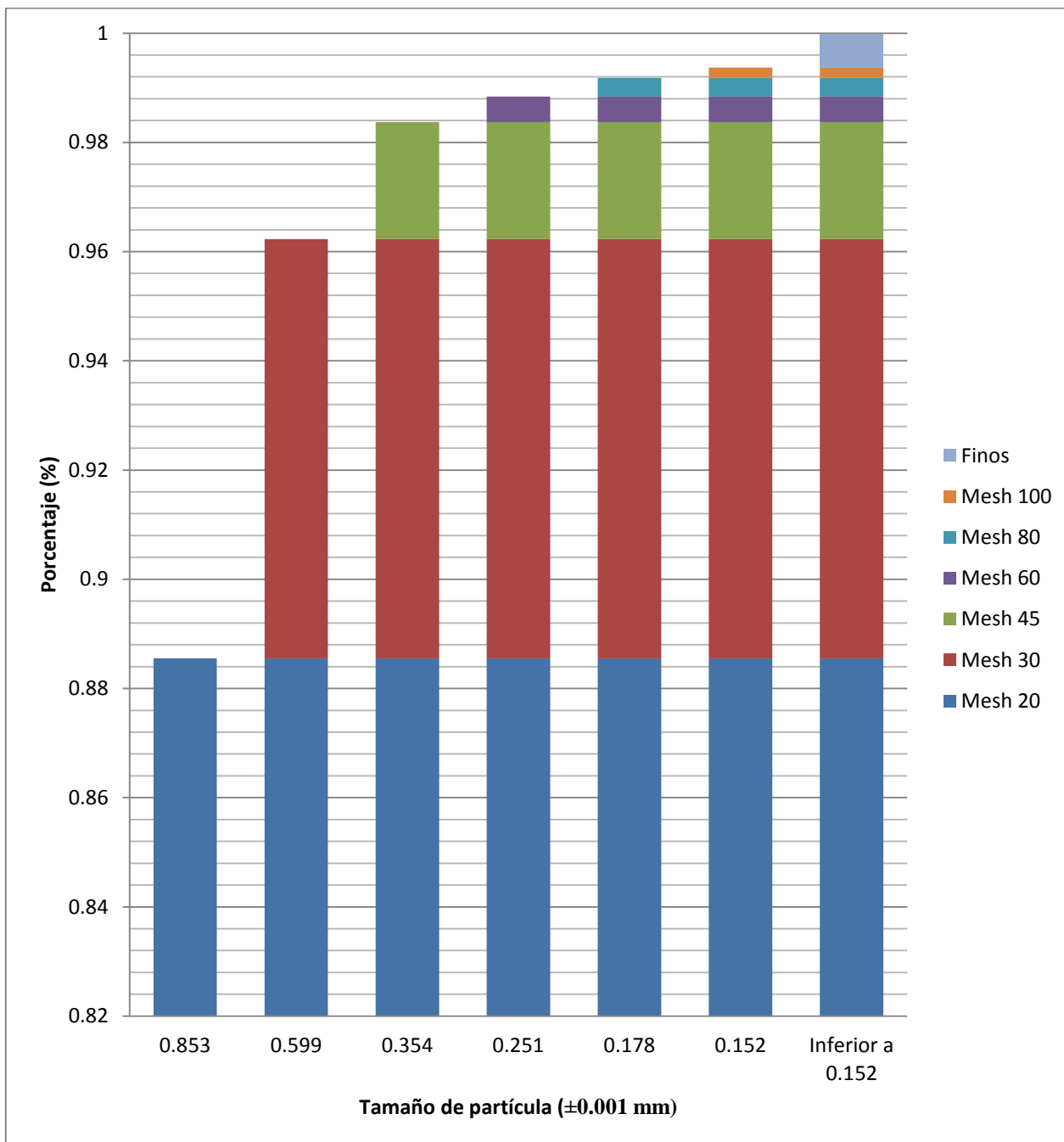


Figura No. 10: Diagrama comparativo de bloques del reciclaje mecánico y la recuperación energética del polipropileno (PP) propuesto.

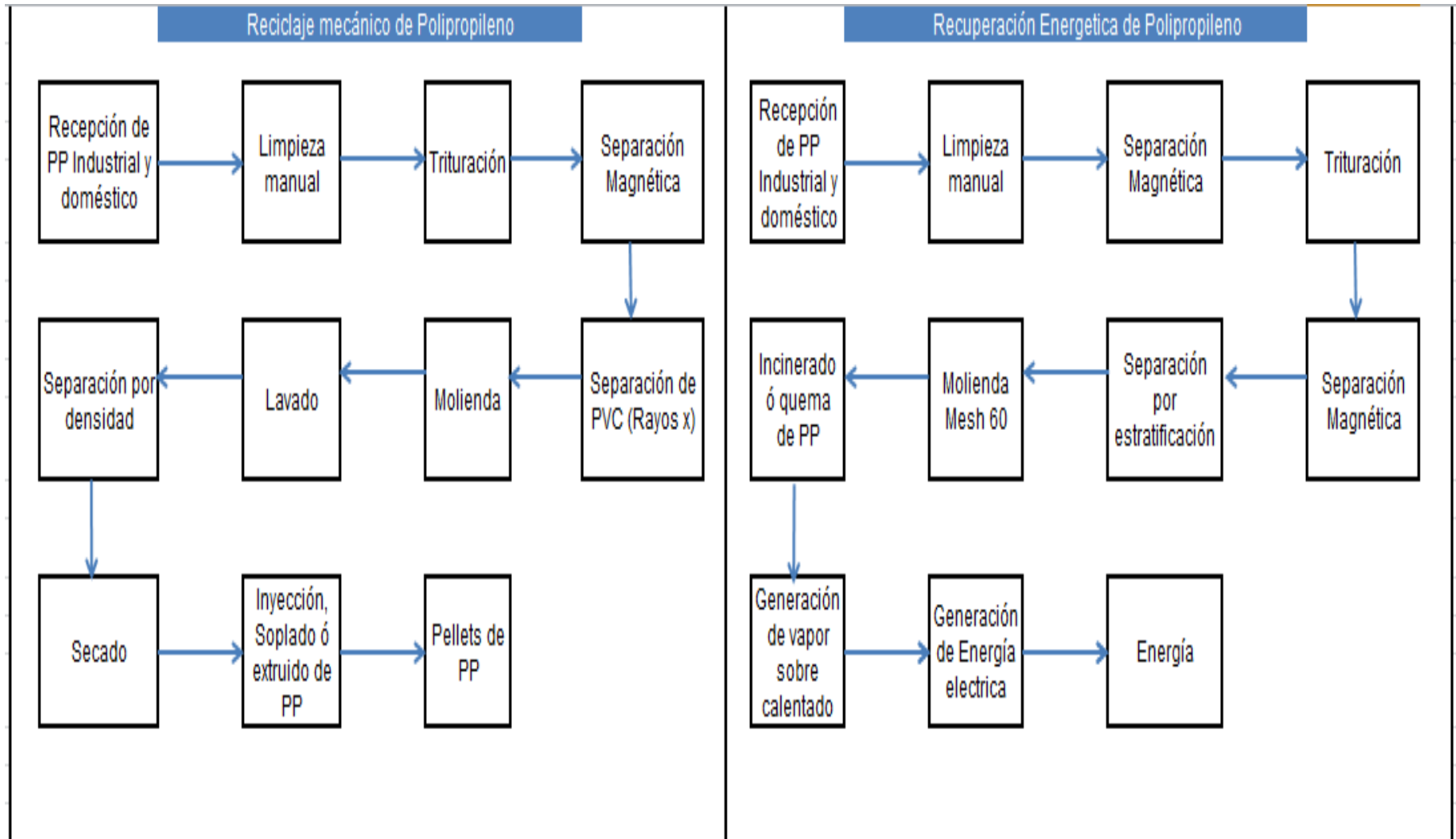


Tabla No.11. Descripción en las etapas del balance de masa y energía (diagrama de flujo del proceso) de la recuperación energética de polipropileno (PP).

Código	Equipo	Objetivo de la etapa
E-100	Transportador de bandas	Transportar el polipropileno recolectado hacia el triturador de cuchillas y realizar una macro limpieza de metales y piedras
E-200	Triturador de cuchillas	Realizar una reducción de los desechos domésticos e industriales para facilitar su recuperación energética
E-101	Transportador de bandas	Transportar el polipropileno reducido del triturador al detector magnético de metales féreos y no féreos
E-300	Detector de metales	Detecta y separa metales féreos y no féreos
E-102	Transportador de bandas	Transporta el polipropileno reducido y sin metales a la mesa densimétrica
E-400	Mesa densimétrica	Separa partículas no deseables como el PVC y piedras junto con otras impurezas
E-103	Transportador de bandas	Transporta el polipropileno sin impurezas, piedras ni PVC hacia el molino de discos para obtener el tamaño del Mesh 60
E-500	Molino de discos	Realiza la reducción del polipropileno a un tamaño de partícula de un Mesh 60
E-104	Transportador de bandas	Transporta el polipropileno del tamaño de partícula adecuado hacia un tanque de almacenamiento
E-600	Caldera acuotubular	Obtiene la energía de los combustibles para transferirla al agua y así generar vapor sobrecalentado
E-700	Turbo generador de vapor	Genera el trabajo por medio del vapor sobrecalentado para luego transformarla en energía eléctrica
E-800	Tanque con precalentamiento de bunker	Almacena y precalienta el bunker a 35°C para poder utilizarlo como combustible en la caldera acuotubular
E-900	Tanque de almacenamiento de PP	Almacena el polipropileno para luego utilizarlo como combustible en la caldera acuotubular
E-1000	Condensador	Condensa el vapor proveniente de la turbina para ser reutilizada como agua de alimentación en la caldera acuotubular
E-1100	Bomba desplazamiento positivo	Bombea los condensados hacia el calentador para luego pasar a la caldera acuotubular
E-1200	Calentador	Utiliza el vapor proveniente de la Turbina para calentar los condensados y luego recircularlos

Tabla No.12. Consumo y generación energético global e indicador de consumo de energía por kWh producido para la línea de recuperación energética.

Consumo de energía (kWh /día)*	Energía generada (Ciclo Regenerativo kWh/día)	Indicador de energía consumida por energía generada
5,222.40	40,671.84	$\frac{0.13kWh \text{ consumido}}{kWh \text{ generado}}$

*En la sección del apéndice se puede observar el balance global del consumo de energía y la producción diaria de energía según el ciclo regenerativo

Tabla No.13. Poder calorífico de los desechos domésticos e industriales de polipropileno (PP).

Poder calorífico (teórico*)	Poder calorífico determinado experimentalmente (PP Doméstico**)	Poder calorífico determinado experimentalmente (PP Industrial**)	Poder calorífico determinado experimentalmente (PP Promedio**)
42.66 kJ/g	21.52±0.31 kJ/g	21.44±0.27kJ/g	21.48±0.41 kJ/g
Intervalo de confianza 95%	(20.76 ≤ 21.52 ≤ 22.28)	(20.78 ≤ 21.44 ≤ 22.10)	

*Referencia Tabla No.4 (Hackettet. al, 2010). ** En la sección de apéndice se encuentra el cálculo del poder calorífico del polipropileno para cada muestra.

Tabla No.14. Comparación económica de los ingresos estimados del producto final y la inversión inicial del reciclaje mecánico y la recuperación energética

	Recuperación energética	Reciclaje mecánico
Inversión inicial*	Q91,664,659.61	Q39,871,840.54
Ingresos*	Q65,072/día	Q57,127.49 /día
Utilidades*	Q14,423,015.29/año	Q8,092,544.15/año
PRI*	6 años	5 años

*Dichos resultados se realizaron de acuerdo al índice de Marshall y se muestra en la sección de apéndice.

VIII. Discusión

En Guatemala existe una problemática con los residuos sólidos. La mayoría de ellos termina en los basureros municipales y no tienen un correcto manejo. Existen varias empresas que realizan el reciclaje mecánico, sin embargo, como lo menciona en una entrevista realizada por la revista "Ingeniería Plástica", al Director de la empresa Plásticos del Pacífico (MBA Romano Giovani Dallamora), afirma que a pesar de que existe una coacción ambiental por parte de Europa y de Estados Unidos, en Guatemala todavía no se ha logrado una cultura a favor del reciclaje, las personas no se encuentran capacitadas ni sensibilizadas. No existe una responsabilidad ambientalista por parte de los guatemaltecos.

Por lo tanto si se quiere lograr una diferencia significativa y hacer que el reciclaje del polipropileno tenga un mayor valor comercial, se tendría que realizar campañas y sensibilizar a la población para generar un verdadero impacto.

En la literatura es relativamente sencillo encontrar el proceso del reciclaje mecánico para el polipropileno, ya que actualmente está bien establecido; sin embargo, se cuenta con pocas bases para la recuperación energética. Debido a esto se realizó una metodología para establecer bases para un proceso el cual permita generar energía a partir de polipropileno-post consumo.

En la sección de resultados se muestra un diagrama comparativo donde se trata de evidenciar las diferencias del reciclaje mecánico y la recuperación energética. Como principal diferencia se puede ver que el proceso de recuperación energética no cuenta con un proceso de lavado. Esto es debido a que no se considera necesario el lavado; ya que el polipropileno va a ser incinerado en una caldera acuotubular. La caldera acuotubular alcanza temperaturas mayores a los 900°C. En la literatura muestra que al alcanzar temperaturas considerablemente altas, mayores a los 800 °C la mayoría de compuestos orgánicos son desintegrados o incinerados. Por lo tanto cualquier residuo u contaminante que pueda contener el polipropileno es irrelevante para el proceso de recuperación energético. Otro aspecto que lo diferencia es que debido a que no hay una etapa de lavado tampoco hay una etapa de secado. Tampoco es necesario realizar un moldeo, extruido o soplado del plástico ya que son etapas propias del reciclaje mecánico.

Para empezar a sentar las bases del proceso se hizo el estudio del poder calorífico del polipropileno; a partir de este valor se puede determinar cuánta energía puede obtenerse al quemar el polímero, en otras palabras, se puede saber cuánta energía libera al llevar a cabo una reacción de combustión utilizando como base el polipropileno. Para determinar su valor y

hacer el estudio se utilizó método de determinación del poder calorífico del manual 457M Calorímetro de Bomba semimicro PAR 6725, donde establece los pasos para realizar dicha determinación.

El método recomienda tener una granulometría específica utilizando un tamaño de partícula de por lo menos 0.251 mm o mesh 60. El objetivo de tener una granulometría específica es tener una mezcla homogénea con el agente que ayuda a la combustión. Según el método recomienda utilizar una mezcla de ácido benzoico y la sustancia que se desea estudiar, que en este caso es el polipropileno. De igual forma en el proceso real se necesita una granulometría específica dependiendo del tipo de horno que se utilice. Si se utiliza un horno de lecho fluidizado es importante el tamaño de partícula para tener una combustión eficiente en la mezcla aire/combustible.

Entonces para el método de la determinación se utiliza una tableteadora para realizar una pastilla para preparar la muestra y posteriormente quemarla. En la metodología recomiendan utilizar ácido benzoico ya que se encuentra estandarizado para el equipo. El ácido benzoico es un polvo fino, utilizado en la industria alimenticia con un poder calorífico conocido por el equipo. Al quemar la pastilla la bomba calorimétrica realiza una relación en masa en donde cuantifica la energía que libera el polipropileno en función de la proporción de polipropileno-ácido benzoico que contiene, por lo tanto, al utilizar ácido benzoico no afecta en la determinación del poder calorífico.

Con base en lo descrito anteriormente se tuvo la molienda del polipropileno doméstico para obtener una granulometría recomendada por el método. Se hicieron tres corridas con tres diferentes muestras. Sin embargo, primero se realizó una reducción manual para luego poder realizar la molienda y obtener el tamaño de partícula deseado. Se utilizó un molino de martillos instalado en la Universidad del Valle de Guatemala debido a que era el equipo que se encontraba disponible, sin embargo, no es adecuado para hacer una molienda de este tipo de material. En el desarrollo de la molienda se tuvo algunos inconvenientes, ya que en algunas corridas el polipropileno alcanza su temperatura de fusión. Como se muestra en la Figura No. 18 el polipropileno pasa de un estado sólido a un estado semi-sólido. Esto se puede deber a diversos factores, podría ser su estructura molecular, el largo de las cadenas o el equipo que se está utilizando. Debido a estos problemas en la molienda en la línea se recomiendan trituradores y molinos especiales para el reciclaje de plásticos, estos son marca TRIA el cual tiene un sistema que permite el adecuado procesamiento del plástico y considera aspectos de diseño que evita problemas de este tipo. Estos molinos son de cuchillas que reducen la fricción y permiten realizar la reducción del plástico. La estructura molecular de la muestra de polipropileno determina la calidad del polímero junto con sus propiedades fisicoquímicas, por lo

tanto, al tener dicho problema en el molino se debe realizar un estudio del tipo de cadena que se tiene y caracterizar adecuadamente el polímero del polipropileno que se va a procesar.

A pesar de los problemas con la molienda se logró obtener el análisis granulométrico. Se hizo un tamizaje con diferentes tamaños de mesh como se muestra en la Figura No. 19. Se elaboró un gráfico con la distribución obtenida para los diferentes tamaños de partícula. Se realizó un promedio de todas las corridas para tener consistencia estadística obteniendo una desviación de ± 0.0006 a ± 0.0016 para la distribución porcentual de los tamaños de partícula de la serie de datos. Esta desviación indica que hay muy poca dispersión entre las corridas realizadas, por lo tanto, es una buena aproximación estadística de los resultados deseados para la experimentación. Con base a esto se hizo el histograma de la distribución de tamaños de partículas que se muestra en la sección de resultados (Gráfica No.2 para el análisis granulométrico). Esta gráfica nos indica que se obtuvo en mayor proporción un tamaño de partícula de 0.853 ± 0.001 mm o mesh 20 con un $88.55 \pm 0.0016\%$ y $0.47 \pm 0.0006\%$ para el tamaño de partícula deseado de 0.251 ± 0.001 mm o mesh 60. De acuerdo al tamaño de partícula obtenido y a los problemas encontrados en la molienda se puede considerar que el molino de martillos instalado en la Universidad del Valle de Guatemala no es el indicado para llevar a cabo el proceso de molienda para la recuperación energética, ya que se obtiene muy poca cantidad de resina con tamaño de partícula de 0.251 mm y presenta problemas al alcanzar el punto de fusión en el proceso de molienda.

Al obtener la resina de polipropileno con el tamaño de partícula deseado se procedió a preparar la muestra para determinar su poder calorífico. Sin embargo, debido a las propiedades mecánicas del polipropileno no se logró obtener una tableta homogénea para quemarla posteriormente. El polipropileno no logró compactarse con el ácido benzoico y no se tuvo una tableta lo suficientemente consistente, por lo tanto, se iba obtener un margen de error considerable para la experimentación. Existía la posibilidad de pérdidas de masa o una combustión incompleta en la bomba calorimétrica. Debido a estos problemas de compactación se procedió a tratar de utilizar otros métodos para la preparación de la muestra, como se muestra en la Figura No. 22. Se elaboró un molde de aluminio y se procedió a calentar la muestra junto con el ácido benzoico para obtener una mezcla de los dos componentes. Este procedimiento fue un fracaso, al calentar el polipropileno con el ácido benzoico, hay una diferencia de temperaturas de fusión considerable. La temperatura de fusión del ácido benzoico es de 122°C y la del polipropileno es 173°C , por lo tanto se evidencia que el ácido benzoico tiene una temperatura de fusión menor a la del polipropileno. En la experimentación el ácido benzoico pasaba de estar de un estado sólido a un estado líquido volatilizándose parcialmente, mucho antes que el polipropileno.

Este procedimiento proporcionaba pérdidas en la masa del ácido benzoico. Como se muestra en la Figura No. 22, se puede observar la formación de cristales de ácido benzoico, debido a la volatilización y enfriamiento del mismo. No se puede aceptar pérdidas de masa debido a que como se mencionó anteriormente, el equipo utiliza una relación de la masa entre el agente que ayuda a la combustión y la masa de la muestra; si se utiliza este procedimiento se tendría errores significativos en la experimentación.

Debido a las pérdidas de masa y los problemas con el ácido benzoico se utilizó un método alternativo. Se buscó un solvente adecuado para utilizarlo en lugar del ácido benzoico. Se escogieron tres solventes que recomendaba el manual de la bomba calorimétrica; el primero fue el ter-butanol, luego se utilizó el 1-Butanol y por último se utilizó etilenglicol. Se utilizó una proporción aproximadamente del 50% en peso (En la sección determinación del poder calorífico se muestra la proporción exacta del solvente y el polipropileno). Con base en la proporción y al poder calorífico obtenido se utilizó un modelo lineal para determinar cuál de los tres solventes proporcionaba un resultado más consistente, para obtener resultados más confiables. Con base a esto se determinó que el etilenglicol mostraba una mayor tendencia lineal en función de la proporción en masa de la muestra y el poder calorífico obtenido.

Se puede decir que el ter-butanol y el 1-butanol se adaptaban al modelo en menor medida que el etilenglicol. El ter-butanol y el 1-butanol son alcoholes, por lo tanto son más volátiles que el etilenglicol, debido a esto en la experimentación se obtenía pérdidas de masa y por lo tanto mostraban una tendencia lineal inferior a los resultados obtenidos con el etilenglicol. En la sección del apéndice se puede observar las gráficas No.3, 4, 5, 6 donde se muestra la experimentación del modelo lineal para escoger el solvente.

Esta experimentación se llevó a cabo con la muestra de polipropileno domiciliario, al establecer que el solvente más adecuado era el etilenglicol, se procedió a determinar el poder calorífico del polipropileno industrial. Esta muestra de polipropileno industrial proviene de los empaques de una reconocida empresa de baterías los cuales habían sido utilizados y descartados. La muestra de polipropileno industrial y residencial se muestra en las Figuras No.19 y 20 respectivamente y se encuentran definidas en la sección de metodología del presente trabajo de graduación.

La metodología descrita anteriormente se realizó para preparar la muestra con el menor margen de error, una vez preparada la muestra se utilizó la bomba calorimétrica en donde se presuriza a 25 atm con oxígeno para asegurar una combustión completa del polipropileno como se muestra en la Figura No. 21. La bomba calorimétrica cuenta con una chaqueta en donde monitoriza la temperatura dentro de la bomba y fuera de la bomba. Este control de temperatura permite generar un perfil de temperatura contra el tiempo. En la sección del apéndice se

muestra el perfil de temperatura a través del tiempo en la Gráfica No.7. Este perfil de temperatura nos muestra la operación del equipo en donde cuenta con un periodo de estabilización de la temperatura que se encuentra constante, luego se da la ignición que se evidencia en un cambio brusco en la pendiente de la gráfica para luego regresar a un periodo constante de temperatura donde evidencia que la muestra a terminado de quemarse.

Este perfil de temperatura muestra las bases del periodo de ignición del polipropileno y ayuda en la metodología para ver si la muestra se ha quemado adecuadamente.

Se obtuvo un poder calorífico de 21.52 ± 0.31 kJ/g con un intervalo de confianza al 95% de $(20.76 \leq 21.52 \leq 22.28)$ para el poder calorífico del polipropileno doméstico y 21.44 ± 0.27 kJ/g con un intervalo de confianza al 95% de $(20.78 \leq 21.44 \leq 22.10)$ para el poder calorífico del polipropileno industrial. Se puede observar que la experimentación presenta resultados bastante confiables debido a que se tiene muy poca dispersión entre las corridas realizadas debido a que las desviaciones estándar tienen una magnitud pequeña, también se puede decir que los resultados están dentro de los límites de confianza al 95% por lo que la metodología utilizada es bastante precisa en la obtención del poder calorífico.

Debido a que la separación de la procedencia del polipropileno es un aspecto idealizado en el proceso de recuperación energético, se tomó el valor promedio de las dos muestras para el diseño de algunos equipos en la línea de recuperación energético. Por lo tanto el valor utilizado como parámetro de diseño en la línea de recuperación energético es de 21.48 ± 0.41 kJ/g. Dicho valor también presenta una desviación aceptable, mostrando poca dispersión, por lo tanto se considera que es un buen punto de partida para el diseño de los equipos debido a su precisión.

Al comparar el valor del poder calorífico obtenido en el laboratorio con el valor proporcionado en la literatura se puede ver una considerable discrepancia. El poder calorífico en la literatura es de 42.66 kJ/g y el obtenido en la experimentación se encuentra en un $49.56 \pm 8.50 \times 10^{-6}\%$ alejado del valor teórico para el polipropileno residencial y en un $49.74 \pm 8.55 \times 10^{-6}\%$ para el polipropileno industrial. Este valor es crítico, ya que de aquí se parte para poder estimar la energía que se puede obtener en la recuperación energética. Esta discrepancia en los resultados se puede atribuir específicamente al largo de cadena, ya que existen diversos tipos de polipropileno y esto depende de la distribución y largo de la cadena.

No se hizo una caracterización de la muestra de polipropileno ya que no se encontraba dentro de los alcances del trabajo de graduación y se necesita un equipo especializado para caracterizar el polipropileno. Con base en la información comercial que se tiene se puede asumir que el polipropileno estudiado es del tipo homopolímero isostático; esto es debido a que es el polipropileno más utilizado comercialmente. Considerando lo anterior, la principal causa en la diferencia del poder calorífico obtenido con el teórico, se le atribuye al largo de cadena. Por

los resultados obtenidos se puede concluir que se tiene cadenas cortas y debido a esto se rompen menos enlaces al quemarse, por lo tanto, libera una menor cantidad de energía que el valor descrito en la teoría.

Cumpliendo con el objetivo de realizar un balance de masa y energía en la línea de recuperación energética de polipropileno se planteó un proceso en donde se establecieron algunas bases de diseño para los equipos principales en la línea.

Para realizar el balance de masa se buscó información en el Banco de Guatemala y se utilizó de referencia las importaciones de polipropileno que ingresan al país. Debido a la falta de cultura en el tema de reciclaje no se tiene un conocimiento concreto de la distribución de los residuos plásticos en Guatemala. Es por esto que se utilizó como referencia la información de un estudio realizado en Bogotá Colombia, donde cuantifican la cantidad de plástico según el tipo de plástico. Con base en este estudio, indican los porcentajes que pueden existir en las corrientes de una línea de reciclaje, siendo un 5% de los residuos materiales como piedras y metales. Otro 5 % puede contener PVC que para la recuperación energética es otro material no deseable debido al contenido de compuestos halogenados (Cl_2) que puede formar ácido clorhídrico que es corrosivo en los equipos.

Sin embargo, se debe considerar que también ingresan al país piezas ya moldeadas o extruidas en forma de juguetes, marcos y otras formas que son imposibles de cuantificar. Por lo tanto, para el balance de materias primas se considera que se pueden utilizar los 51,396.5 ton de PP/ año, que es el total de polipropileno importado en el país, esto como un dato base y debido a que no todo va ser desechado, y la planta no puede reciclar todo el polipropileno que ingresa al país se considera aproximadamente un 17.66% del total.

Con base a lo anterior se determinó que la capacidad de la planta sería de 1,036.5 kg/h, este flujo másico de polipropileno se estimó que se va a tener aproximadamente un 5% de pérdidas distribuidas en toda la línea de recuperación energética (Tabla No.15). En el proceso establecido se obtienen 983.6 kg de polipropileno por hora que pueden ser utilizados para realizar la recuperación energética. En el proceso se utiliza un 75% de la resina y un 25% de un combustible cuyo poder calorífico teóricamente es parecido al del polipropileno. Este combustible es el bunker y es utilizado para asegurar una combustión completa del polipropileno. El bunker tiene un poder calorífico promedio de 40.1 kJ/g según la teoría. Del total de polipropileno procesado para quemar se va almacenar un 10%, esto es para asegurar de que se tenga suficiente polipropileno y se pueda cumplir con los requerimientos de energía.

Para propósitos del trabajo no se pudo determinar si al realizar la mezcla de bunker/polipropileno presentaba problemas en la combustión resultando en una inhibición de la energía proporcionada. Debido a la falta de información se consideró que esto no sucedía, sin

embargo, se debe realizar un estudio de la quema conjunta de los dos materiales para tener una base más sólida para el diseño de los equipos.

Luego en función de la energía proporcionada por el polipropileno y el bunker; la entalpia del agua de alimentación y la entalpia del vapor que se podría generar, se dimensionó la caldera acuotubular que se muestra en la sección del apéndice. Para la línea de recuperación energética se necesita una caldera de 10 MW. Es recomendable según la teoría utilizar una cámara de combustión de lecho fluidizado para mejorar el rendimiento de la combustión y así necesitar temperaturas más bajas. La temperatura necesaria para quemar el polipropileno es de 1000°C, esto es para evitar la formación de compuestos orgánicos contaminantes.

Se realizó un balance de los gases de chimenea considerando que únicamente se iban a producir monóxido de carbono, dióxido de carbono y vapor de agua. Esto debido a que se desconoce la composición química del polipropileno y es necesario realizar una caracterización para poder determinar que sucede en la reacción de combustión. Sin embargo con base en la teoría se determinó que se iba a producir 11.37 mg/m³ de vapor de agua, 11.11 mg/m³ de dióxido y 0.13 mg/m³ de monóxido de carbono. Al tener dichos datos cumplen con las regulaciones ambientales para la Unión Europea (UE) según la tabla que se encuentra en antecedentes del presente trabajo de graduación. En dicha tabla se indica que los límites de emisiones para el monóxido de carbono son de 50 mg/m³. Es importante regular las emisiones de dióxido y monóxido de carbono ya que son gases de efecto invernadero y esto se puede hacer con un lavador de gases en donde se capturan las partículas contaminantes evitando que se liberen al ambiente.

Con base al balance de masa se establecieron los principales equipos que se necesitaban en la línea de recuperación energética, ya que no se cuenta con mediciones experimentales, se hizo teóricamente. Los equipos recomendados son bandas transportadoras, una mesa densimétrica que funciona por estratificación, un detector de metales entre otros (tablas No. 18 a 20). En función de dichos equipos se estableció un balance de energía general para determinar el consumo energético en la línea de recuperación de energía el cual fue de 5,222.40 kWh al día teniendo un funcionamiento de 24 horas en el día. También se consideró el trabajo teórico que tendría que hacer la bomba del ciclo regenerativo. Por otro lado se determinó que debido al trabajo realizado por la bomba los condensados ganan 1.06°C lo cual favorece al proceso y se determinó que el bunker necesitaría 9.6 kJ por cada kg de bunker para poder ser bombeado hacia la caldera.

Luego con base a la presión y los kilogramos de vapor que se producen se buscó una turbina de vapor que trabaje a dicha presión. Se encontró una turbina de vapor marca SIEMENS que trabaja a 11,000 kPa de 10MW y funciona bajo un ciclo regenerativo. Con base

en las especificaciones técnicas del proveedor se realizó el balance de masa y energía del ciclo regenerativo. El ciclo regenerativo cuenta con la caldera acuotubular mencionada anteriormente, esta caldera transfiere la energía del combustible hacia el agua. El agua cambia de fase y se transforma en vapor sobrecalentado para transportar dicha energía hacia la turbina de vapor. Esta turbina transforma la energía que contiene el vapor en energía mecánica, para luego ser transformada en energía eléctrica por medio del generador. Se determinó con base al balance de masa y energía que para el ciclo regenerativo se puede obtener 40,671.84 kWh/ día que puede ser vendida a la red pública.

Se estimó un indicador del consumo de energía por kWh producido y se obtuvo que para la línea de recuperación energética se consumen teóricamente 0.13 kWh por cada kWh producido. Este indicador es de mucha ayuda ya que puede ser un punto de partida para futuros procesos de recuperación energético que podría cambiar si se realiza un estudio más detallado del proceso.

Por último se estableció una comparación de las ganancias estimadas para la recuperación energética y para la venta de la resina asumiendo que no se utilizará en la línea de recuperación energética.

Para la venta de energía se tomó un precio base proporcionado por la comisión nacional de energía eléctrica en Guatemala CNEE de 1.60 por kWh producido. El precio de la resina de polipropileno fue proporcionado por el banco de Guatemala en donde indica que el precio de la resina sin clasificar por color y sin tener un proceso de limpieza es de Q2.42/lb. Con base en estos se obtuvo los ingresos estimados para la generación de energía que es de Q65, 072 al día y Q57,127.49 al día para la venta de la resina de polipropileno. De igual forma se estimó los egresos para la generación de energía que es de Q25, 556.90 al día y de Q34,956.13 al día para la venta de la resina de polipropileno. Con base en los ingresos y egresos estimados se hizo la estimación de las utilidades para los dos procesos los cuales fueron para la generación de energía que es de Q14, 423, 015.29 al año y Q8, 092, 544.15 al año para la venta de la resina de polipropileno.

Se estimó la inversión inicial para los dos procesos con el fin de poder compararlos. La inversión inicial para el proceso de recuperación energético es de Q91,664,659.61 y la inversión para un proceso de reciclaje mecánico es de Q39, 871,840.54 considerando la misma capacidad de 1036.5 kg de polipropileno por hora. Con base a las estimaciones anteriores se determinó el periodo simple de recuperación para los dos procesos siendo de 5 años para el caso hipotético que se realice la venta de la resina y 6 años para la línea de recuperación de energía.

Al comparar las utilidades de los dos procesos se puede ver que se obtiene mayores ganancias con la línea de recuperación energética, lo cual es una ventaja sobre un reciclaje mecánico, sin embargo, se tiene una diferencia en la recuperación de la inversión de un año debido a que se tiene mayores costos de inversión en la línea de recuperación energética. Se deben considerar más aspectos que engloben una investigación de mercado para determinar si la diferencia de un año es crítica para determinar la rentabilidad del proceso. Sin embargo, si se consideran las utilidades después de seis años se puede decir que la línea de recuperación energética es económicamente viable comparado al proceso de reciclaje mecánico.

IX. Conclusiones

1. La principal diferencia entre el proceso de reciclaje mecánico y la recuperación energética del polipropileno es que no se cuenta con las etapas de lavado, secado, extruido, moldeado o inyectado del polímero para el proceso de recuperación energético.
2. Se determinó que el molino de martillos instalado en la Universidad del Valle de Guatemala, este no es adecuado para realizar la molienda de polipropileno doméstico. Se utilizó este molino debido a que se encontraba disponible para el estudio.
3. Se obtuvo con el balance de masa y energía a partir de una capacidad calorífica inferior a la mostrada en la teoría de 21.48 ± 0.41 kJ/g y 1,036.5 kilogramos de polipropileno por hora de capacidad, se obtienen 40,671.84 kWh al día
4. Con base en el balance de energía se consumen 0.13 kWh por cada kWh producido. Por lo que se genera más energía de la que se consume.
5. Según las pruebas experimentales el poder calorífico experimental del polipropileno doméstico es de 21.52 ± 0.31 kJ/g y el poder calorífico del polipropileno industrial es de 21.44 ± 0.27 kJ/g lo cual indica que tiene un bajo poder calorífico comparado con el valor teórico de 42.66 kJ/g y el poder calorífico del bunker de 40.1 kJ/g, el cual se utiliza como combustible.
6. Se hizo una comparación de las utilidades estimadas para la recuperación energética y para la venta de la resina antes de realizar la recuperación energética, en donde se obtiene una utilidad de Q14,423,015.29 al año con un periodo de recuperación de 6 años para la recuperación energética y una utilidad de Q8,092,544.15 al año con un periodo de recuperación de 5 años para la venta, lo que indica que se obtienen mayores ingresos en la recuperación energética después de un periodo de 6 años.

X. Recomendaciones

1. Realizar un estudio de los tipos de plásticos que se tienen en los vertederos municipales en la ciudad de Guatemala. Con el objetivo de cuantificar los distintos tipos de polímeros que se desechan en la ciudad.
2. Considerar cómo afecta a la combustión la mezcla de un combustible como el bunker y el uso de un plástico como el polipropileno. Con el fin de determinar si la reacción sucede simultáneamente o si se inhibe debido a la mezcla.
3. Complementar el trabajo con una propuesta del proceso del reciclaje químico con el objetivo de obtener los monómeros en el polímero de polipropileno.
4. Hacer una caracterización del polipropileno. Esto ayudaría a determinar el largo de cadena, la energía teórica que puede proporcionar en función del número de enlaces que se pueden romper y la composición real de los gases de combustión.
5. Desarrollar como complemento al presente trabajo de graduación un proceso de reciclaje para los desechos de PVC. El PVC contiene cloro el cual es un compuesto halógeno que puede formar ácido clorhídrico en el proceso de reciclaje y presenta complicaciones de corrosión en los equipos.
6. Considerar un análisis económico para el proceso de reciclaje mecánico y para el proceso de la recuperación energética para poder realizar una comparación más exacta de los aspectos económicos en los dos procesos.
7. Ejecutar experimentalmente un análisis de gases de combustión para determinar el impacto ambiental real que causa el polipropileno en el ambiente.

XI. Bibliografía

1. Australian Council of Recycling (ACOR). 2003. *Recycling guide for gillers marketing in HDPE*. Recuperado el 13/05/13, de:
http://www.nzbcscd.org.nz/_attachments/ACOR_HDPE_Guide.pdf
2. Arandes *et.al.*, 2004, *Revista iberoamericana de polímeros: Reciclado de residuos plásticos*, Recuperado el 15/04/2013 de: <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/MAR04/Danilo2004.pdf>
3. Banco de Guatemala, 2013, *Importaciones Realizadas*, Recuperado el 10/01/14 de:
http://www.banguat.gob.gt/estaeco/ceie/hist/pdfs/2013/CG/vendedor/kf-116_2013.pdf
4. Barcala, J; *et al.* s.f. *Clasificación automática de envases plásticos*. Recuperado el 13/05/13 de: <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIV/documentos/ro/56.pdf>
5. Brandrup, J. 1996. *Recycling and recovery of plastics*. Alemania. Editorial HanserVerlag. 893 Pp.
6. Bruno, Edward. s.f. *Automated Sorting of plastics for recycling*. Recuperado el 13/05/13de:
<http://www.p2pays.org/ref/09/08620.pdf>
7. Caballeros *et. al.*, 2008, *Planta de reciclaje de plástico*, recuperado el 02/08/13 de:
<http://www.ingenieroambiental.com/2060/planta%20de%20reciclado.pdf>
8. Ceresana, 2011, *Market study polypropylene*, Recuperado el 31/03/13 de:
<http://www.ceresana.com/en/market-studies/plastics/polypropylene/polypropylene-market-share-capacity-demand-supply-forecast-innovation-application-growth-production-size-industry.html>
9. CGP+L, 2004, *Reporte nacional de residuos sólidos en Guatemala*, recuperado el 02/04/13 de:
[http://www.infoiarna.org.gt/media/file/areas/desechos/documentos/nac/\(6\)%20PLASTICOS_DIVERSOS_GUA.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/media/file/areas/desechos/documentos/nac/(6)%20PLASTICOS_DIVERSOS_GUA.pdf)

10. CNEE, 2010, *Promotores de ahorro y eficiencia de energía eléctrica*, Recuperado el 10/01/14 de:
[http://www.cnee.gob.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/004%20M%C3%B3dulo%20IV%20\(AEE%20Motores%20de%20Inducci%C3%B3n\).pdf](http://www.cnee.gob.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/004%20M%C3%B3dulo%20IV%20(AEE%20Motores%20de%20Inducci%C3%B3n).pdf)
11. C. Raderet *al*, 1995, *Plastics, rubber, and paper recycling a pragmatic approach*, American Chemical Society, Washington, D.C. Págs. 532
12. European Plastic Converters (EuPC), et al. 2011. *Plastics – the Facts 2011, Analysis of European plastics production, demand and recovery for 2010*. Recuperado el 31/03/13 de:
http://www.plasticseurope.org/documents/document/20101006091310-final_plasticsthefacts_28092010_lr.pdf
13. F. Hernandez, 2010, *Análisis técnico, económico y medioambiental de los potenciales sustitutos de los hidrocarburos en el mercado español de los combustibles para automoción*, Recuperado el 15/04/2013 de:
http://oa.upm.es/4657/1/FERNANDO_HERNANDEZ_SOBRINO.pdf
14. G. Dodbiba, 2006, *Sorting techniques for plastics recycling*, Recuperado el 13/05/13 de:
<http://www.jproeng.com/qikan/manage/wenzhang/206502.pdf>
15. G. Karian, 2003, *Handbook of polypropylene and polypropylene composites*, Second edition, Whitmore lake, Michigan, USA, Marcel Dekker Inc. págs. 740
16. I. Aracil, 2008, *Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirolisis y combustión de plásticos*, Recuperado el 10/01/14 de:
http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf
17. INE, 2010, *Residuos 2010*, Recuperado el 13/05/13 de:
<http://www.ine.gob.gt/np/ambientales/index.htm>
18. Ingeniería Plástica, 2006, *La industria del reciclado en Guatemala*, recuperado el 12/04/13 de: http://www.ingenieriaplastica.com/Entrevistas/entre_Pacifico_07.html
19. J. McMurry, 2008, *Química Orgánica*, Séptima edición, CENGAGE learning, México D.F. págs. 1220

- 20.J. Fernández, 2006, *Capítulo No.1: Poder calorífico*, recuperado el 11/01/2014 de:
http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf
- 21.Jóvenes Socialistas del País Valencia (JSPV). 2010. *Guía de buenas prácticas medioambientales*. Recuperado el 10/04/13 de:
http://www.jselx.org/_documentos/Guia_Buenas_Practicas_Reciclaje.pdf
- 22.MARN, 2009, *Informe ambiental del estado de Guatemala*, recuperado el 02/04/13 de:
<http://www.sia.marn.gob.gt/Documentos/geo09.pdf>
- 23.M. Gómez *et. al.*, 2001, *Educación medioambiental: Los plásticos y su reciclado(Los plásticos automoción)*, Educación permanente, Madrid, pág. 29
- 24.M. Verespej, 2013, *Polypropylene: the next big thing in recycling*, Recuperado el 13/05/2013 de: <http://resource-recycling.com/node/3587>
- 25.M. Hackett *et. al*, 2010, *Heats of combustion of high temperature polymers*, Recuperado el 23/08/2013 de: <http://large.stanford.edu/publications/coal/references/docs/hoc.pdf>
- 26.Opex Energy, 2009, *Turbinas de vapor*, Recuperado el 10/01/14 de: http://www.opex-energy.com/termosolares/turbina_de_vapor_termosolar.html#1._INTRODUCCION.
- 27.Pascoe, R. D. 2000. *Sorting of waste plastics for recycling*. Volumen 11, No. 4, Reporte 124. Editorial iSmithers Rapra Publishing. 109 Pp.
- 28.PNUMA, 2000, *Manual de legislación ambiental en Guatemala*, recopilado el 10/01/14 de:
<http://www.corteidh.or.cr/tablas/20491a.pdf>
- 29.Recoup, 2005, *The recycling of polypropylene containers*, Recuperado el 20/04/2013 de:
http://www.recoup.org/shop/product_documents/147.pdf
- 30.Skoog A. *Química analítica*, Séptima edición McGRAW –Hill, impreso en México (2001)
- 31.SPI, 2012, *The plastics industry trade association*, Recuperado el 10/04/13 de:
<http://www.plasticsindustry.org/aboutspi/?navItemNumber=1009>

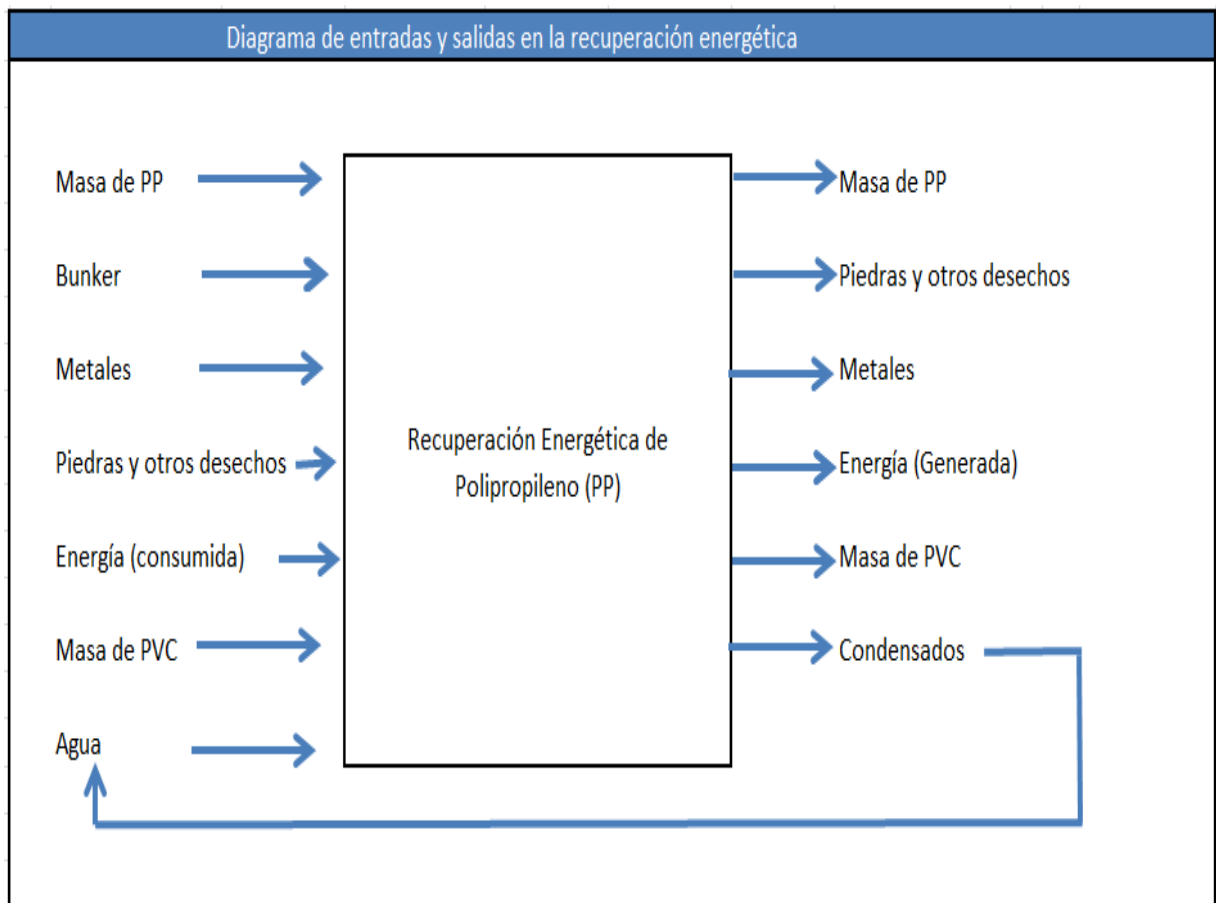
32. Spirax Sarco, 2004, *Calderas y accesorios*, Recuperado el 10/01/14 de:
http://www.spiraxsarco.com/cl/pdfs/training/gcm_04.pdf
33. Tall, Stefan. 2000. *Recycling of mixed plastic waste*. Recuperado el 13/05/13 de:
https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:0Xsf9PsnEcGJ:kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:8665/FULLTEXT01+Recycling+of+Mixed+Plastic+Waste%E2%80%93+Is+Separation+Worthwhile?&hl=es&gl=gt&pid=bl&srcid=ADGEESigWRgLcxurkvKOSQ5x_UuSdvG
34. United Nations Environment Programme (UNEP). 2009. *Converting waste plastics into a resource*. Recuperado el 31/03/13 de:
http://www.unep.or.jp/letc/Publications/spc/WastePlasticsEST_Compndium.pdf
35. URL, 2009, *Perfil ambiental de Guatemala 2008-2009*, recuperado el 02/04/13 de:
http://biblio3.url.edu.gt/IARNA/serie_amb/11.PDF
36. V. Goodship, 2007, *Introduction to plastics recycling*, Second edition, SMITHERS RAPRA, United Kingdom, Págs. 184
37. Virtual European Recycling Centre (VERC). 2005. *Technological reference paper on recycling plastics*. Recuperado el 13/05/13 de:
http://www.wastexchange.co.uk/documenti/H%20_Medio_Ambiente_PROYECTOS_Z5008_verc_clara_WP2_refpaper_Refpaper_plastic_v2.pdf
38. Y.-H. Lin *et. al.*, 2005, *Fluidised bed pyrolysis of polypropylene over cracking catalysts for producing hydrocarbons*, Recuperado el 15/04/2013 de:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014139100500039X>

XII. Apéndice

Bases teóricas

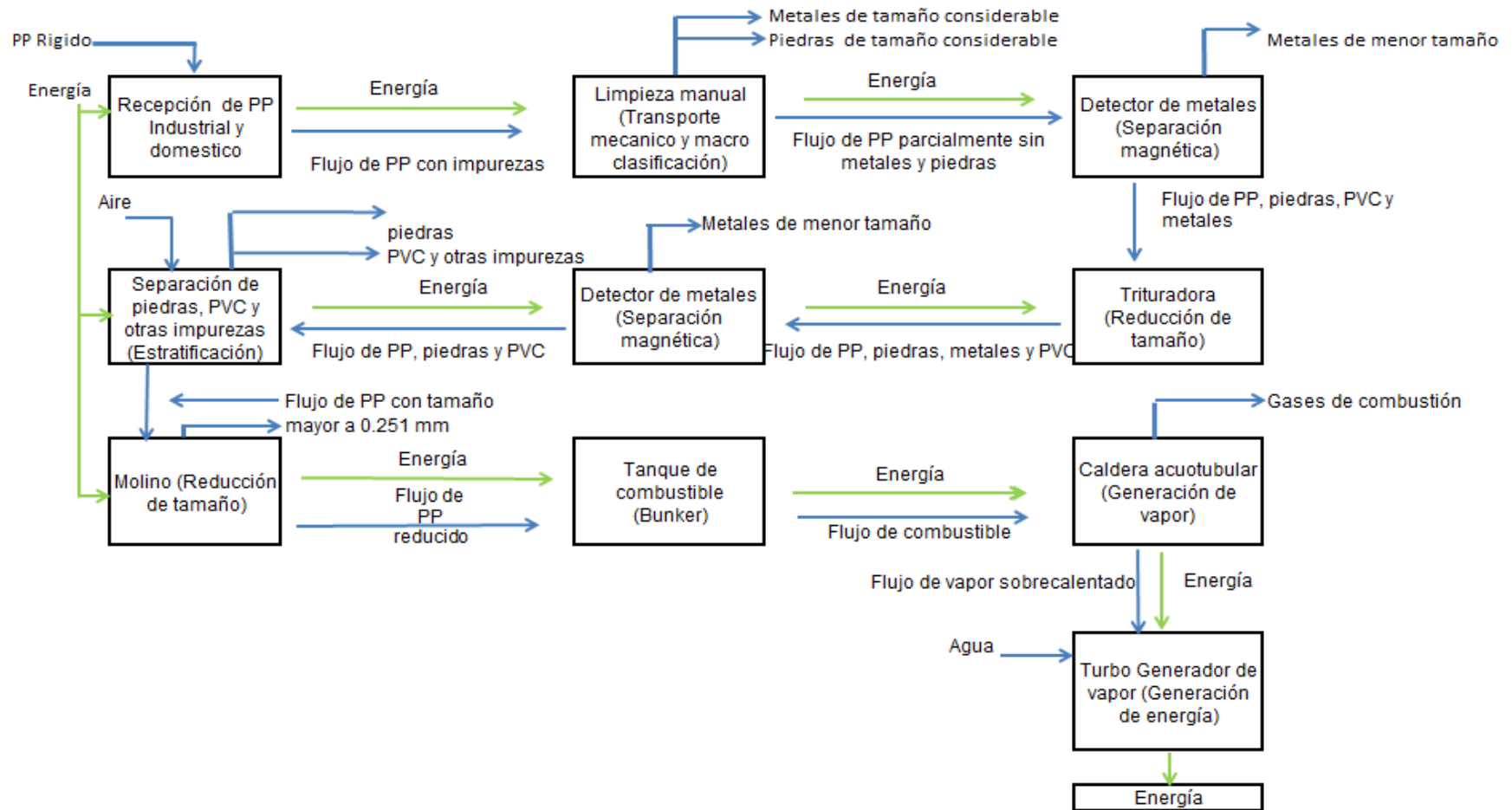
A. Diagrama de entradas y salidas del proceso de recuperación energética de polipropileno:

Figura No. 12: Diagrama de entradas y salidas del proceso de recuperación energética de polipropileno



B. Diagrama de operaciones unitarias del proceso de recuperación energética de polipropileno:

Figura No. 13: Diagrama de operaciones unitarias del proceso de recuperación energética de polipropileno



C. Datos originales:

Tabla No.15. Porcentaje de la distribución de los flujos globales en el proceso.

Aspecto	Porcentaje
Polipropileno disponible en la línea*	17.66%
Piedras	2.5%
Metales	2.5%
Desechos de PVC	3%

*Ver detalle en el balance de masa (Caballeros *et. al.*, 2008)

Tabla No.16. Porcentajes estimados de las pérdidas en el proceso para el balance de masa.

Etapas del proceso	Pérdidas (%)*
Banda transportadora inicial (Metales de gran tamaño)	0.05
Banda transportadora inicial (Piedras de gran tamaño)	0.03
Pérdidas en bandas transportadoras	0.01
Pérdidas trituración	0.1
Separación electrostatica	1.5
Separación por estratificación	1.5
Molienda	1
Separación PVC	1

*Estos porcentajes se obtuvieron de un estudio en Bogotá para una planta de reciclaje de plástico

D. Cálculos de muestra:

1. Balance de Masa:

Balance de Materia prima:

Según información obtenida en el Banco de Guatemala, con la partida No. 3902.10.00 para importaciones de polipropileno en formas primarias, se registra que en Guatemala ingresa 51, 396, 519 kg al año con un precio CIF de \$83, 226,850. (Banco de Guatemala, 2013)

Debido a la carencia de información se asume que todo el polipropileno en formas primarias que ingresa al país se encuentra disponible para ser reciclado. Se considera esto como base ya que esta forma del polipropileno no es la única que ingresa al país. También ingresan piezas ya moldeadas o extruidas en forma de juguetes, marcos y otras formas que son imposibles de cuantificar. Debido a esto se utilizó la cantidad de polipropileno en formas primarias ya que es un dato cuantificado y más confiable, de igual forma se utilizó un estudio

realizado en Bogotá Colombia, para poder conocer la distribución de los flujos en la línea de reciclaje. Con base en este estudio, indican que un 5% de los residuos son materiales como piedras y metales. Otro 5 % puede contener PVC que para la recuperación energética es otro material no deseable. (URL, 2009)(Caballeros *et. al.*, 2008) (Banco de Guatemala, 2013)

Por lo tanto, para el balance de materias primas se considera que se pueden utilizar los 51,396.5 ton de PP/ año como base y debido a que no todo va ser desechado, y la planta no puede reciclar todo el polipropileno que ingresa al país se considera aproximadamente un 17.66% del total de polipropileno que ingresa al país.

Balance del proceso de recuperación energético:

A partir de los porcentajes mostrados en la Tabla No.16 y el balance de materia prima con datos del Banco de Guatemala, se estimó la cantidad posible a utilizarse en la línea de recuperación energética de polipropileno de la siguiente forma:

$$\text{Capacidad de la planta} = \text{Masa de Sólidos de PP totales en Guatemala} * 0.1766$$

$$\text{Capacidad de la planta} = 51,396.5 \frac{\text{ton PP}}{\text{año}} * 0.1766 = 9079.6 \text{ ton Plástico/año}$$

$$\text{Capacidad de la planta} = 9079.6 \frac{\text{ton Polipropileno}}{\text{año}} * \frac{1000\text{kg}}{1\text{ton}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{24\text{h}}$$

$$\text{Capacidad de la planta} = 1,036.5 \text{ kg de Polipropileno/h}$$

En la Tabla No.15 se muestra el resumen de los flujos bases para realizar el balance de masa, en la línea de la recuperación energético se asumieron ciertos porcentajes de pérdidas en los equipos, estos porcentajes se muestran en la Tabla No.16. Con base a dichos porcentajes se obtuvo el balance de masa para cada etapa del proceso como se muestra en la Tabla No.26. A continuación se muestra el cálculo del balance global de masa:

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

$$\text{Entrada} = A + B + C$$

$$A = \text{Polipropileno y otros desechos} = 1036.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$B = \text{Bunker} = 300 \text{ kg/h}$$

$$C = \text{Condensados (Agua de caldera)} = 11,707 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Salida} = D + E + F + G + H + I + J + K$$

$$D = \text{Polipropileno para combustión} = 983.6 * 0.90 = 885.24 \text{ kg/h}$$

$$E = \text{Polipropileno para almacenar} = 983.6 * 0.1 = 98.36 \text{ kg/h}$$

$$F = \text{Metales} = (1036.5 * 0.0005) \frac{\text{kg}}{\text{h}} + (1034.5 * 0.015) \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 16.0 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$G = \text{Piedras y otros desechos} = (1036.5 * 0.0003) \frac{\text{kg}}{\text{h}} + (1019 * 0.015) \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 15.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$H = \text{PVC} = (1019 * 0.01) \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 10.2 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$I = \text{Vapor sobre calentado} = 11,707 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$J = \text{Masa de polipropileno Perdido} = A - (D + E + F + G + H) = (1036.5 - 1025.4) \frac{\text{kg}}{\text{h}} \\ = 11.1 \text{ kg/h}$$

$$K = \text{Combustible sobrante} = 0.033 * 300 = 10 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Entonces:

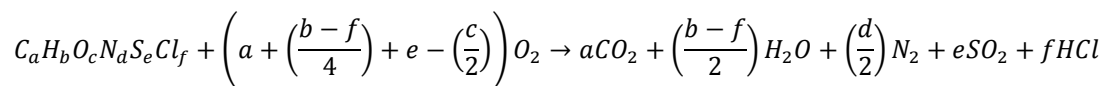
$$\text{Entrada} = (1036.5 + 300 + 11707) \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 13,043.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Salida} = (885.24 + 98.36 + 16 + 15.6 + 10.2 + 11,707 + 11.1 + 10 + 290) \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 13,043.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

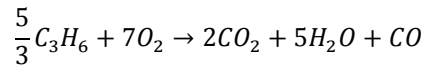
En la tabla No. 26 y 27 se encuentra el balance de masa global y detallada para la línea de recuperación energética.

Balance de los gases de combustión debido a la quema de polipropileno (PP):

Para realizar el balance de los gases de combustión es necesario conocer la composición química del combustible. En el presente trabajo se desconoce la composición química del polipropileno utilizado en la determinación del poder calorífico, sin embargo, se tiene como referencia la ecuación química utilizada en el estudio "Heat of combustion of high temperature polymers" utilizado como referencia del poder calorífico. La ecuación química proporcionada para el polipropileno (PP) es C_3H_6 y con base a esto se procede a realizar el balance de los gases de combustión con la siguiente reacción: (Hackett *et. al*, 2010)



Por lo tanto, si se considera que el polipropileno no contiene oxígeno, nitrógeno, azufre y cloro la ecuación general queda de la siguiente manera:



Entonces el balance quedaría:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

Entradas = Polipropileno + oxígeno

$$\text{Polipropileno} = 885.24 \text{ kg PP} * \frac{1 \text{ kmol PP}}{42.08 \text{ kg}} = 21.04 \text{ kmol PP}$$

$$\text{Oxígeno} = 21.04 \text{ kmol PP} * \frac{7 \text{ kmol } O_2}{\frac{5}{3} \text{ kmol PP}} = 88.37 \text{ kmol } O_2$$

$$\text{Entradas} = \text{Polipropileno} + \text{oxígeno} = (21.04 + 84.16) \text{ kmol} = 109.41 \text{ kmol}$$

Salidas = Dioxido de carbono + Monoxido de carbono + Agua

Dioxido de carbono

$$\begin{aligned} &= 21.04 \text{ kmol PP} * \frac{2 \text{ kmol } CO_2}{\frac{5}{3} \text{ kmol PP}} * \frac{44.01 \text{ kg } CO_2}{1 \text{ kmol } CO_2} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \\ &* \frac{1}{1 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ gases}} = 11.11 \frac{\text{mg } CO_2}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Monoxido de carbono

$$\begin{aligned} &= 21.04 \text{ kmol PP} * \frac{1 \text{ kmol } CO}{\frac{5}{3} \text{ kmol PP}} * \frac{28.01 \text{ kg } CO}{1 \text{ kmol } CO} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} * \frac{1}{1 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ gases}} \\ &= 0.13 \frac{\text{mg } CO}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= 21.04 \text{ kmol PP} * \frac{5 \text{ kmol } H_2O}{\frac{5}{3} \text{ kmol PP}} * \frac{18.01 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} * \frac{1}{1 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ gases}} \\ &= 11.37 \frac{\text{mg } H_2O}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

El balance realizado fue considerado bajo condiciones ideales y muestra una aproximación teórica de la producción de los gases de chimenea que se estarían produciendo. Los resultados obtenidos para el CO₂ y el CO según las regulaciones de la UE cumplen con los requisitos ambientales, ya que se emiten menos de 50 mg/m³ de CO (monóxido de carbono) según las regulaciones mostradas en la sección de antecedentes.

2. Dimensionamiento de equipos:

a. **Dimensionamiento de la caldera acuotubular:** Con base al poder calorífico experimental del Polipropileno obtenido en la experimentación y asumiendo una mezcla de un combustible para asegurar la combustión del polipropileno, realizado de igual forma en la experimentación con un solvente. Se escogió el combustible bunker con un poder calorífico de 40.1 kJ/g debido a la facilidad de obtención en el mercado y su bajo costo comparado con otros combustibles comerciales; con base a la mezcla de los dos combustibles se estableció la energía a ser aprovechada.

Se utilizó como base una relación en masa de 75% de polipropileno y un 25% del combustible para ayudar a la ignición y quema completa en el proceso. Se almacena un 10% del polipropileno listo para quemar en caso hubiera una escases de materia prima, con el fin de poder seguir produciendo energía.

Un aspecto importante que no se tomó en cuenta debido a la falta de información es que la energía que proporciona la combustión del polipropileno. Esta energía se asumió que se podía sumar, sin embargo, en la práctica se deben realizar estudios para determinar si la reacción del bunker con el polipropileno no se inhibe en la combustión provocando pérdidas en las mismas. Para fines prácticos del presente trabajo de graduación se asumió que no interviene el bunker en la reacción y que la energía se puede sumar sin considerar otros factores.

Energía del polipropileno:

$$\frac{885.24 \text{ kg PP}}{h} * \frac{21,480 \text{ kJ}}{\text{kg PP}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 5,281.93 \text{ kW}$$

Energía del Bunker:

$$\frac{290 \text{ kg Bunker}}{h} * \frac{40,100 \text{ kJ}}{\text{kg bunker}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 3,230.28 \text{ kW}$$

Energía total a ser aprovechada:

$$\text{Energía total} = 5,281.93 \text{ kW} + 3,230.28 \text{ kW} = 8,512.21 \text{ kW}$$

Por lo tanto:

Sabiendo que la temperatura del agua de alimentación a la caldera se encontrará a 193.38 °C debido al ciclo regenerativo (ver dimensionamiento del turbogenerador) y que la entalpia del agua de alimentación será de 827.98 kJ/kg. Con base a la caldera encontrada de 10MW se sabe que el vapor se encuentra a 11,000 kPa (1500PSI) ya que es la presión que requiere la

turbina y es la presión de operación que especifica el proveedor de la caldera para generar energía lo cual requerirá una entalpia de 3,414.9 kJ/kg.

Por lo tanto:

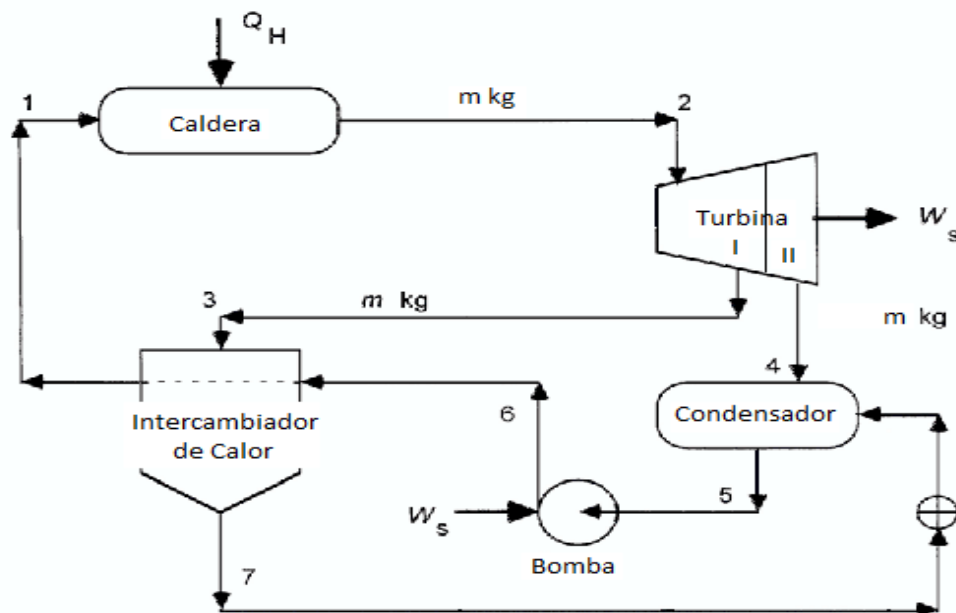
$$\dot{m} = \frac{\text{Energía total}}{\dot{H}_{\text{agua}} - \dot{H}_{\text{vap}}} = \frac{8,512.21 \text{ kJ}}{s} * \frac{3600s}{1h} * \frac{1}{\frac{(3414.9-827.98)kJ}{kg}} = 11,707 \text{ kg vap/h}$$

Con base a los cálculos realizados se necesita una caldera acuatubular de 8.5 MW que genere 11,707 kg de vapor por hora a una presión de 11,000 kPa (1500 PSI), sin embargo, se va utilizar un 20% aproximadamente de sobredimensionamiento por lo que se utilizará una caldera de 10 MW.

b. Dimensionamiento del turbogenerador y los equipos auxiliares:

Balance de masa y energía para el ciclo regenerativo: El sistema de generación eléctrica se asume que se rige bajo un ciclo regenerativo, por lo tanto consta básicamente de una caldera que genera vapor sobrecalentado, una turbina de vapor que convierte el trabajo mecánico en energía eléctrica, un condensador que recupera el vapor producido, una bomba que recircula el condensado y un calentador de condensados que es recalentado con el vapor residual de la turbina. Se puede observar el sistema en la Figura No.14.

Figura No. 14: Generación de energía según el ciclo regenerativo



Se hizo los cálculos con base a la energía experimental y según las especificaciones del turbogenerador encontrado marca SIEMENS. El turbogenerador necesita vapor sobrecalentado a 11,000 kPa y 520°C en la entrada y se descarga a 25 kPa. El vapor para el calentador de

agua de alimentación se extrae de la turbina a 1600 kPa y durante la condensación del agua. Se asume que la eficiencia de la bomba es de 80% y de la turbina es de un 60% para fines del dimensionamiento.

A continuación se muestra la definición de algunas variables que serán utilizadas en los cálculos de esta sección:

$$\begin{array}{lll}
 W = \text{trabajo realizado por la máquina} & \beta = \text{coeficiente de expansión volumétrica} & V = \text{volumen específico} \\
 S = \text{Entropía del agua} & \sigma = \text{Eficiencia de la máquina} & T = \text{temperatura} \\
 H = \text{Entalpía del agua} & P = \text{presión} & m = \text{masa de vapor}
 \end{array}$$

Por lo tanto:

Se tiene vapor saturado que entra a la turbina a las siguientes condiciones:

$$\begin{array}{l}
 11,000 \text{ kPa} - H_2 = 3,414.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 520^\circ\text{C} - S_2 = 6.61 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}
 \end{array} \quad (\text{Smith, 2007})$$

Para la etapa de extracción del vapor para calentamiento se sabe que $S'_3 = S_2$ y que el vapor se encuentra a las siguientes condiciones, interpolando en las tablas de vapor para la entropía de alimentación de la turbina:

$$\begin{array}{l}
 1600 \text{ kPa} \\
 S'_3 = S_2 = 6.61 H'_3 = 2,900.21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{array} \quad (\text{Smith, 2007})$$

Entonces, la entalpía de alimentación del vapor al tanque de condensados, se determina con la entalpía de alimentación a la turbina más el trabajo de la primera sección de la turbina, con las siguientes ecuaciones:

$$H_3 = H_2 + W_1$$

$$W_1 = \sigma_{\text{turbina}}(H'_3 - H_2) \quad (\text{Smith, 2007})$$

Entonces:

$$W_1 = 0.80 * \left(2,900.21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 3,414.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = -411.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$W_1 = -411.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * m_3 = -411.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * (2,966.45 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right)) = -339.29 \text{ kW}$$

$$H_3 = 3,414.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left(-411.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 3,003.15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Luego en la descarga de la turbina sucede una expansión isentrópica a 25 kPa, por lo tanto en esta sección se tendrá líquido saturado y vapor a las siguientes condiciones:

$$H_{liq} = 270.36 \frac{kJ}{kg} \quad H_{vap} = 2,617.65 \frac{kJ}{kg}$$

$$S_{liq} = 0.8881 \frac{kJ}{kg K} \quad S_{vap} = 7.8395 \frac{kJ}{kg K}$$

$$S'_4 = S_2 = 6.61 \quad (\text{Smith, 2007})$$

Con base a estas condiciones se determina la fracción de masa que pasa a través de la sección II de la turbina con la siguiente ecuación:

$$x'_4 = \frac{S'_4 - S_{liq}}{S_{vap} - S_{liq}} = \frac{(6.61 - 0.8881) \frac{kJ}{kgK}}{(7.8395 - 0.8881) \frac{kJ}{kgK}} = 0.8231$$

En función de dicha fracción se puede determinar la entalpia de la fracción del vapor que entra a la sección II de la turbina y así determinar la entalpia de entrada al condensador con las siguientes ecuaciones:

$$H'_4 = H_{liq} + x'_4(H_{vap} - H_{liq})$$

$$H_4 = H_2 + \sigma_{Turbina}(H'_4 - H_2)$$

(Smith, 2007)

Entonces la entalpia de entrada al condensador es de:

$$H'_4 = 270.36 \frac{kJ}{kg} + 0.8231 * \left(2,617.65 \frac{kJ}{kg} - 270.36 \frac{kJ}{kg} \right) = 2,202.41 \frac{kJ}{kg}$$

$$H_4 = 3,414.9 \frac{kJ}{kg} + 0.80 \left(2,202.41 \frac{kJ}{kg} - 3,414.9 \frac{kJ}{kg} \right) = 2,444.91 \frac{kJ}{kg}$$

Luego, en el condensador se tiene el vapor condensado a las siguientes condiciones:

$$H_5 = H_{liq} = 270.36 \frac{kJ}{kg} \quad P_5 = 25 \text{ kPa}$$

$$V_5 = 1.0195 \frac{cm^3}{g} \quad P_1 = P_6 = 11,000 \text{ kPa}$$

(Smith, 2007)

En función de las condiciones del líquido condensado, se procede a calcular el trabajo necesario para la bomba con la siguiente ecuación:

$$W_{bomba} = \frac{V_5(P_6 - P_5)}{\sigma_{bomba}} \quad (\text{Smith, 2007})$$

Entonces:

$$W_{bomba} = \frac{1.0195 \frac{cm^3}{g} * \left(\frac{1000g}{1,000,000cm^3} \right) (11,000kPa - 25kPa)}{0.80} = 13.99 \frac{kJ}{kg}$$

$$W_{bomba} = 13.99 \frac{kJ}{kg} * m_{6-5} = 13.99 \frac{kJ}{kg} * 2,966.45 \frac{kg}{h} * \left(\frac{1h}{3600} \right) = 11.53 kW$$

Luego se determina las condiciones del condensado a la salida de la bomba y el aumento de temperatura debido al paso por la bomba, con las siguientes ecuaciones:

$$H_6 = H_5 + W_{bomba} \text{ (Smith, 2007)}$$

$$W_{bomba} = \Delta H = C_p \Delta T + V(1 - \beta T) \Delta P \text{ (Smith, 2007)}$$

Entonces, la energía del líquido a la salida de la bomba es:

$$H_6 = 270.36 \frac{kJ}{kg} + 13.99 \frac{kJ}{kg} = 284.35 \frac{kJ}{kg}$$

El Cambio de temperatura debido al trabajo de la bomba es:

$$\Delta T = \frac{\Delta H - V(1 - \beta T) \Delta P}{C_p} = \frac{11.53 \frac{kJ}{kg} - 1019.5 \frac{m^3}{kg} \left(1 - \frac{1.082 \times 10^{-3}}{K} 337.73 K \right) \frac{10975 kPa}{10^6}}{4.178 \frac{kJ}{kg K}}$$

$$\Delta T = 1.06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Luego se tienen las condiciones del líquido saturado de condensación a 1600 kPa y se necesita conocer la entalpia del líquido comprimido a 11,000 kPa en la entrada de la caldera, se logra con los siguientes datos conocidos:

$$H_7 = 858.561 \frac{kJ}{kg} \quad T_{7 (liq. sat)} = 201.37 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Al recircular los condensados se determinó una elevación de temperatura de 8 °C por lo tanto la temperatura a la entrada de la caldera será:

$$T_1 = T_{7 (liq. sat)} - 8^\circ\text{C} = 201.37^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C} = 193.37^\circ\text{C}$$

Por lo tanto a estas condiciones de temperatura se tienen las siguientes condiciones del líquido saturado a la entrada de la caldera, y tomando en cuenta que P1 = P6:

$$H_{liq.sat} = 822.5 \frac{kJ}{kg} \quad P_{liq. sat} = 1,350.59 \text{ kPa} \quad V_{liq. sat} = 1.146 \frac{cm^3}{g}$$

$$\beta = \frac{1}{V_{liq. sat}} \left(\frac{\delta V}{\delta T} \right)_P = \frac{1}{1.146 \frac{cm^3}{g}} \left(\frac{1.159 - 1.128}{25} \right) \frac{cm^3}{g} = 1.082 \times 10^{-3} K^{-1}$$

Con los datos anteriores se puede determinar la entalpia del líquido saturado a la entrada de la caldera con la siguiente ecuación:

$$H_1 = H_{liq.sat} + V_{liq. sat} (1 - \beta T_1) * (P_1 - P_{liq. sat}) \text{ (Smith, 2007)}$$

Entonces la energía del líquido saturado a la entrada es:

$$H_1 = 822.5 \frac{kJ}{kg} + 1.146 \frac{cm^3}{g} * \left(\frac{1000g}{1,000,000cm^3} \right) (1 - (1.082 \times 10^{-3} K^{-1} * 466.52 K)) * (11,000 \text{ kPa} - 1,350.59 \text{ kPa})$$

$$H_1 = 827.98 \frac{kJ}{kg}$$

El calor suministrado en la caldera se detalló en la sección de dimensionamiento de caldera, sin embargo, el siguiente cálculo es una comprobación del mismo como se muestra a continuación:

$$m_1 = m_2$$

$$Q_H = m(H_2 - H_1)$$

Entonces el calor que se suministra a la caldera sería:

$$Q_H = 11,707 \frac{kg}{h} * \frac{1h}{3600s} (3,414.90 - 827.98) \frac{kJ}{kg} = 8,412.52 \text{ kW}$$

Luego se debe determinar el trabajo realizado en la segunda sección de la turbina y se realiza de igual forma con un balance de masa y energía para dicha sección:

$$W_{II} = (m_2 - m_3)(H_4 - H_3)$$

Entonces se necesita saber la masa que es extraída en la sección I para determinar el trabajo realizado por la sección II y este se determina con un balance de energía como se muestra a continuación:

Sabiendo que para cumplir con la demanda de vapor se tienen las siguientes igualdades:

$$m_1 = m_6 \quad y \quad m_7 = m_3$$

Con base a estas igualdades el balance para obtener la masa 3 queda:

$$m_3 = \frac{H_1 - H_6}{H_3 - H_7} * m_2$$

Entonces:

$$m_3 = \frac{827.98 \frac{kJ}{kg} - 284.56 \frac{kJ}{kg}}{3003.15 \frac{kJ}{kg} - 858.56 \frac{kJ}{kg}} * 11,707 \frac{kg}{h} = 2966.45 \frac{kg}{h}$$

Entonces el trabajo realizado en la sección II de la turbina sería:

$$W_{II} = (11,707 - 2966.45) \frac{kg}{h} * \left(\frac{1h}{3600s} \right) * (2,444.91 - 3003.15) = -1355.37 kW$$

El trabajo neto realizado por la turbina sería la suma del trabajo en las dos secciones como se muestra a continuación:

$$W_{Turbina} = W_I + W_{II} = (-1355.37 kW) + (-339.29 kW) = -1,694.66 kW$$

El calor removido en el condensador se determina de la siguiente manera:

$$Q_c = Q_H - W_{nominal} = 8,412.52 kW - 10,000 kW = -1,587.48 kW$$

Por último se determina la eficiencia del ciclo térmico para establecer cuanta energía se generó para la venta:

Se determina el trabajo realizado neto que se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$W_{neto} = W_I + W_2 + W_{bomba} = (-1355.37 kW) + (-339.29 kW) + 11.53 kW = -1,683.13 kW$$

La eficiencia se estima de la siguiente manera:

$$\sigma_{Eficiencia\ del\ ciclo\ termico} = \frac{|W_{neto}|}{Q_H} = \frac{1683.13 kW}{8,412.52 kW} = 0.20$$

Con base a la eficiencia del ciclo térmico y al trabajo realizado por la turbina se puede determinar cuanta energía está produciendo la planta al día.

$$Energía\ generada = W_{Turbina} * \sigma_{Eficiencia}$$

$$Energía\ generada = 1,694.66 kW * \left(\frac{24h}{1día} \right) = 40,671.84 \frac{kWh}{día}$$

c. **Pre calentamiento del bunker:** para su utilización El bunker a temperatura ambiente se encuentra en un estado sólido. Debido a esto se necesita precalentarse para poder ser utilizado en la caldera. En la tabla No.17 se muestran las características del combustible y con base a esto se determinará cuanta energía se debe agregar para precalentar el bunker:

Tabla No.17. Características fisicoquímicas del bunker.

Propiedad	Unidad	metodo de ensayo	Rango
Viscosidad cinemática 100°C (1)	mm ² /s	ISO 3104	6.0 to 55.0
Densidad a 15°C	kg/m ³	ISO 3675 or ISO 12185	950 to 1010 (2)
Punto de inflamabilidad	°C	ISO 2719	> 60
Temp. de fluidez	°C	ISO 3016	< 30
Residuo de carbón		ISO 10370	< 22 (2)
Cenizas	% (m/m)	ISO 6245	< 0.20
Agua	% (v/v)	ISO 3733	< 1.0
Azufre (3)	% (m/m)	ISO 8754	Inland < 3.5 Marine < 5.0
Vanadio	mg/kg	ISO 14597	< 600
Aluminio más silicio	mg/kg	ISO 10478	< 80

Como se muestra en la Tabla No.17 la temperatura a la que debe estar para que fluya, es una temperatura mayor a 30°C por lo tanto se determina cuanto calor se debe agregar para que este fluya con la siguiente ecuación:

$$Q = mC_p\Delta T$$




Si se determina cuanto calor se necesita por kg de bunker y se asume un cambio de temperatura de 25 a 35 °C siendo este de 10°C el calor necesario por kg de bunker es el siguiente:

$$Q = \frac{0.96kJ}{kg K} * 10 K = 9.6 \frac{kJ}{kg}$$

Por lo tanto se necesita suministrar 9.6 kJ por cada kg de bunker para que este fluya a una temperatura de 35 °C.





Debido a la falta de datos experimentales en muchos puntos del proceso, el dimensionamiento de los equipos se basa en el balance de masa establecido para el proceso y según los proveedores encontrados en el mercado. A continuación se detallan los principales equipos que son necesarios en la línea de recuperación energética:

Tabla No. 18. Especificaciones técnicas del equipo necesario en la línea de recuperación energética.

Equipo	Imagen	Código	Cantidad de equipos	Especificaciones técnicas
Banda transportadora inicial para la clasificación manual		E-100	3	Marca: TRIA Serie: 450-60 Capacidad: 300-350 kg/h Longitud: 4500 mm Ancho: 560 mm Potencia del motor: 0.37 kW
Banda transportadora (Trituradora-Detector de metales)		E-101	2	Marca: TRIA Serie: 600-80 Capacidad: 510-550 kg/h Longitud: 7000 mm Ancho: 760 mm Potencia del motor: 1.5 kW
Banda transportadora (Detector de metales - Mesa de separación densimétrico)		E-102	2	Marca: TRIA Serie: 600-80 Capacidad: 510-550 kg/h Longitud: 7000 mm Ancho: 760 mm Potencia del motor: 1.5 kW


*Únicamente se incluyeron los equipos principales en la línea

Tabla No.19. Continuación de las especificaciones técnicas del equipo necesario en la línea de recuperación energética.

Equipo	Imagen	Código	Cantidad de equipos	Especificaciones técnicas
Banda transportadora (Mesa de separación densimétrico - Molino)		E-103	2	Marca: TRIA Serie: 600-80 Capacidad: 510-550 kg/h Longitud: 7000 mm Ancho: 760 mm Potencia del motor: 1.5 kW
Banda transportadora (Molino- Caldera acuotubular)		E-104	2	Marca: TRIA Serie: 600-80 Capacidad: 510-550 kg/h Longitud: 7000 mm Ancho: 760 mm Potencia del motor: 1.5 kW
Trituradora para la reducción primaria		E-200	1	Marca: TRIA Serie: WLK10 Tipo: Cuchillas Capacidad: 900-1200 kg/h Potencia del motor: 55 kW
Detector de metales (Metales férreos y no férreos)		E-300	2	Marca: AN HU SHEN Serie: EJH-14 Altura: 1200 mm Longitud: 1950 mm Ancho: 1100 mm Capacidad: 500-550 kg/h Consumo Energético: 1.4 kW

*Únicamente se incluyeron los equipos principales en la línea

Tabla No.20. Continuación de las especificaciones técnicas del equipo necesario en la línea de recuperación energética.

Equipo	Imagen	Código	Cantidad de equipos	Especificaciones Técnicas
Mesa de Separación Densimétrica (estratificación)		E-400	1	Marca: Leabond Serie: TQFS63 Capacidad: 900-1500 kg/h Potencia motor: 0.5 kW Potencia ventilador: 4 kW Aire: 5100 m3/h Presión del aire: 980 Pa
Molino (Reducción de PP)		E-500	1	Marca: TRIA Serie: 100-60 BLM Tipo: Discos Capacidad: 600-1000 kg/h Potencia del motor: 55 kW
Caldera Acuotubular (Generación de vapor)		E-600	1	Marca: Cleaver Brooks Modelo: D-Style Flujo de Vapor: 4,545-227,272.72 kg/h Capacidad: 10MW Presión de diseño: 1500PSI Combustible: Diésel, Bunker, Gas natural, Combustibles alternativos
Turbogenerador (generación de energía)		E-700	1	Marca: SIEMENS Modelo: SST-200 Capacidad: 10 MW P entrada: 11000kPa T entrada: 520°C P salida: 25 kPa P Extracción de turbina: 1600kPa

*Únicamente se incluyeron los equipos principales en la línea

d. Balance de energía para el consumo de los equipos: Se tomó como base los consumos de cada equipo mostrado en la sección de dimensionamiento de equipos (tablas No. 16 a 18). De igual forma se tomó la cantidad de energía estimada a generar por la turbina de vapor, considerando que la línea trabajara 24 horas al día con 15 días para mantenimiento y reparación de equipos teniendo 350 días al año para trabajar.

Con base a lo anterior se estimó el consumo descrito por los proveedores en 24 h de operación. El balance de energía únicamente considera el consumo energético como la electricidad consumida por los equipos, ya que no se proporciona energía en forma de calor en las etapas anteriores a la recuperación energética.

Se consideró una eficiencia del 65% para los motores eléctricos ya que la eficiencia de un motor eléctrico se encuentra entre el 60-80% y se puede considerar un 10% en pérdidas energéticas, por lo tanto se considera una eficiencia estándar del 75% menos un 10% por pérdidas de energía como se muestra a continuación: (CNEE, 2010)

$$\text{Energía Requerida} = \frac{\text{Consumo de energía}}{\text{Eficiencia}} = \frac{0.37kW}{0.65} = 0.57 kW$$

A continuación se muestra en la siguiente tabla con el consumo de energía para cada equipo.

Tabla No.21. Energía consumida al día para cada etapa del proceso en función del número de equipo y los requerimientos de energía.

Etapas del proceso	Requerimiento de energía (kW)	Cantidad de equipo	Consumo total de energía (kW)	Consumo de energía por hora /día (kWh/día)*
Banda transportadora inicial para la clasificación manual	0.57	3	1.71	40.98
Banda transportadora (Entre procesos)	2.31	8	18.46	443.08
Trituradora para la reducción primaria	84.62	1	84.62	2030.77
Detector de metales (Metales férreos y no férreos)	2.15	2	4.31	103.38
Mesa de Separación Densimétrico (estratificación)	6.15	1	6.15	147.69
Molino de cuchillas (Reducción de PP)	84.62	1	84.62	2030.77
Bomba	17.74	1	17.74	425.72

e. Comparación de ganancias a partir del producto final del reciclaje mecánico y la recuperación energética:

Planta de recuperación energética

Venta de energía a partir de la recuperación energética de la resina de polipropileno (PP):

Según información encontrada en la comisión nacional de energía eléctrica en Guatemala, el costo de la energía eléctrica es de Q1.60 por kWh. Con base a este precio se estimó las ganancias que pueden proporcionar la línea de recuperación energética: (CNEE, 2010)

$$\frac{1.60}{kWh} * \frac{40,670 kWh}{día} = \frac{Q65,072}{día}$$

Estimación la inversión inicial de la planta:

Para determinar el costo de los equipos se utilizó el manual del Ing. Químico Perry en el cap. 9 la tabla 9.50 el cual se basa en los índices de Marshall. A continuación se muestra un ejemplo para la banda transportadora inicial donde se realiza la clasificación manual con la siguiente ecuación: (Perry, 2001)

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^n * \left(\frac{I_a}{I}\right) \text{ (Perry, 2001)}$$

$$C_2 = \$3,700 \left(\frac{2.52}{9.3}\right)^{0.5} * \left(\frac{1750}{1000}\right) = \$3,322.38$$

A continuación se muestra la tabla donde se detalla el costo de la inversión inicial para la planta de recuperación energética:

Tabla No.22. Estimación del costo de los principales equipos en la línea de recuperación energética.

Descripción	Capacidad	U. Ingeniería	No. Equipo	Tamaño Perry	Exponente	Costo Perry FOB	Costo Unitario	Costo total
Banda transportadora inicial para la clasificación manual	2.52	m2	3	9.3	0.5	\$3,700	\$ 3,322.38	Q78,939.81
Banda transportadora (Trituradora-Detector de metales)	5.32	m2	6	9.3	0.5	\$3,700	\$ 4,827.31	Q229,393.76
Trituradora para la reducción primaria	55	kW	1	74.6	0.92	\$130,000	\$ 169,412.87	Q1,341,749.95
Detector de metales (Metales féreos y no féreos)	0.14	kW	1	N/A	N/A	N/A	\$ 2,500.00	Q19,800.00
Mesa de Separación Densimétrico (estratificación)	14	m2	1	46	0.62	\$10,000	\$ 8,250.47	Q65,343.71
Molino (Reducción de PP)	55	kW	1	N/A	N/A	N/A	\$ 5,000.00	Q39,600.00
Caldera Acuotubular (Generación de vapor)	11,707	kg/h	1	N/A	N/A	N/A	\$ 3,156,565.66	Q25,000,000.00
Turbogenerador (generación de energía)	10	MW	1	N/A	N/A	N/A	\$ 300,000.00	Q2,376,000.00
							Total	Q29,150,827.23

El tipo de cambio utilizado fue de Q7.92/\$1, según el Banco de Guatemala

Tabla No.23. Estimación del costo de fletes e impuestos.

Flete Internacional	4%	Q 1,166,033.09
IVA	12%	Q 139,923.97
Gasto aduanal, transporte interno, otros	1%	Q 303,168.60
Costo Total del equipo en Guatemala	Q 30,759,952.89	

Tabla No.24. Estimación del costo de los servicios en la planta.

Descripción	Factor	Total
Equipo	1	Q 30,759,952.89
Instalación	0.41	Q 12,611,580.68
Tubería	0.34	Q 10,458,383.98
Electricidad	0.13	Q 3,998,793.88
Instrumentación	0.13	Q 3,998,793.88
Edificación y servicios	0.3	Q 9,227,985.87
Excavación y preparación	0.15	Q 4,613,992.93
Auxiliares	0.52	Q 15,995,175.50
TOTAL INVERSION		Q 91,664,659.61

La inversión total para la planta es de Q91, 664,659.61 considerando los factores del Perry y haciendo la corrección con el índice de Marshall. Es preciso mencionar que dicha estimación contiene precios para electricidad, instrumentación, edificación y servicios que pueden estar sobre estimados para la realidad guatemalteca. Por lo tanto se debe realizar un estudio de mercado para tener precios más exactos y el resultado únicamente es un indicativo de la inversión que se necesitaría fuera de la realidad guatemalteca.

Egresos y utilidades estimadas para la línea de recuperación energética:

Debido a la falta de datos para realizar la estimación de los egresos en la línea de recuperación energética, se utilizó como referencia el trabajo de graduación elaborado por Gabriela Gudiél en donde indica que los costos estimados o egresos para una planta de este tipo son aproximadamente del 32% de la inversión inicial del equipo en la línea. (Gudiél, 2012)

Por lo tanto la estimación de las utilidades se puede realizar de la siguiente manera:

$$\text{Egresos estimados} = Q29,150,827.23 * 0.32 = Q9,328,264.71/\text{año}$$

Para determinar las utilidades se debe realizar un balance entre los egresos e ingresos en la línea de recuperación como se detalla a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Utilidades estimadas} &= \text{Ingresos} - \text{Egresos} = \left(\frac{Q65,072}{\text{día}} * \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \right) - Q9,328,264.71/\text{año} \\ &= Q14,423,015.29/\text{año} \end{aligned}$$

Este valor es una buena aproximación, sin embargo, se debe realizar un análisis detallado de los costos para poder tener una mejor referencia.

Periodo simple de recuperación de la inversión (PRI):

Para determinar los años en que se va a recuperar la inversión se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{PRI} &= \frac{\text{Inversión}}{\text{Utilidades netas}} \text{ (Gudiél, 2012)} \\ \text{PRI} &= \frac{Q91,664,659.61}{Q14,423,015.29/\text{año}} \quad 6.35 \sim 6 \text{ años} \end{aligned}$$

El periodo de recuperación de la inversión es a 6 años

Planta de reciclaje mecánico

Venta de Resina de polipropileno (PP) como materia prima:

El precio de la resina de polipropileno como materia prima para su posterior utilización, según el Banco de Guatemala, si no se ha clasificado por colores ni ha llevado un proceso de limpieza tiene un precio de Q2.42/kg. En cambio sí ha pasado por un proceso de limpieza y clasificación de color posee un mayor valor, por lo tanto tiene un precio de Q4.75/kg.

Como en el proceso planteado en el siguiente trabajo no tiene un proceso de limpieza, ni clasificación de color se toma un precio base de Q2.42/kg, por lo tanto, si se considera la misma producción por hora. Considerando esto se obtienen las siguientes ganancias:

$$\frac{Q2.42}{\text{kg PP}} * \frac{983.6 \text{ kg PP}}{\text{h}} * \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} = \frac{Q57,127.49}{\text{día}}$$

Estimación la inversión inicial de la planta:

Según el trabajo de graduación realizado en la Universidad del Valle de Guatemala para un proceso de reciclaje mecánico de diversos plásticos se estima que la inversión inicial es de Q89, 652,147.03, para una planta con capacidad de 4000 kg/h. Si se desea realizar el escalamiento se puede utilizar la siguiente ecuación:(Gudiél, 2012) (SINNOT, 2008)

$$C_2 = C_1 \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^n \text{ (SINNOT, 2008)}$$

$$C_2 = Q89,652,147.03 \left(\frac{1036.5}{4000} \right)^{0.6} = Q39,871,840.54$$

El factor “n” se puede considerar entre 0.6 y 0.8 para plantas que contienen muchos procesos mecánicos. (SINNOT, 2008)

Egresos y utilidades estimadas para la línea de recuperación energética:

Debido a la falta de datos para estimar los egresos en el caso que se realizara la venta de la resina, se utilizó como referencia el trabajo de graduación elaborado por Gabriela Gudiél en donde indica que los costos estimados o egresos para una planta de este tipo son aproximadamente del 32% de la inversión inicial del equipo en la línea. (Gudiél, 2012)

Por lo tanto la estimación de las utilidades se puede realizar de la siguiente manera:

$$Egresos\ estimados = Q39,871,840.54 * 0.32 = Q12,758,988.97/año$$

Para determinar las utilidades se debe hacer un balance entre los egresos e ingresos en la línea de recuperación como se detalla a continuación:

$$\begin{aligned} Utilidades\ estimadas &= Ingresos - Egresos = \left(\frac{Q57,127.49}{día} * \frac{365\ días}{año} \right) - Q12,758,988.97/año \\ &= Q8,092,544.15/año \end{aligned}$$

Este valor es una buena aproximación, sin embargo, se debe realizar un análisis detallado de los costos para poder tener una mejor referencia.

Periodo simple de recuperación de la inversión (PRI):

Para determinar los años en que se va a recuperar la inversión se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} PRI &= \frac{Inversión}{Utilidades\ netas} \text{ (Gudiél, 2012)} \\ PRI &= \frac{Q39,871,840.54}{Q8,092,544.15/año} = 4.92 \sim 5\ años \end{aligned}$$

El periodo de recuperación sería de cinco años en el caso hipotético que se vendiera la resina. Estas estimaciones son bastante superficiales y hace falta considerar más detalles y esto únicamente se hizo para poder comparar los dos procesos.

E. Datos calculados:*Tabla No.25. Porcentaje de la distribución de los flujos globales en el proceso.*

Total de desechos (Guatemala)	1,746,059 Ton/año
Desechos Plásticos (13%)	226,988 Ton/año
Desechos de Polipropileno (20%)	45,398 Ton/año
Desechos de Polipropileno Disponible	1,036.5 kg/h

(URL, 2009)(Caballeros *et. al.*, 2008) (INE, 2010)

Tabla No.26. Balance de masa para cada etapa del proceso de recuperación energético.

	Etapa	Entrada (kg/h)		Salida (kg/h)	
E-100	Banda transportadora inicial y macro clasificación manual	1. Polipropileno recolectado	1,036.5	1. Polipropileno para triturar	1035.5
				2. Metales de gran tamaño	0.5
				3. Piedras de gran tamaño	0.3
E-200	Trituración del PP	1. Polipropileno a triturar	1,035.5	1. Polipropileno triturado	1034.5
E-300	Separación magnética	1. Polipropileno triturado	1,034.5	1. Polipropileno sin metal	1019.0
				2. Metales en el proceso	15.5
E-400	Separación por densidad	1. Polipropileno sin metal	1,019.0	1. Polipropileno sin piedras	993.5
				2. PVC en el proceso	10.2
				3. Piedras y otras impurezas	15.3
E-500	Molienda de PP mesh 60	1. Polipropileno sin intermedio	993.5	1. Polipropileno molido	983.6
E-600	Caldera acuotubular	1. Condensados	11,707	1. Flujo de vapor sobrecalentado	11,707
		2. Flujo de bunker	491.8		
		3. Flujo de PP	491.8		
E-700	Turbina de vapor	1. Flujo de vapor Sección I	2,966.45	1. Vapor residual	2,966.45
		2. Flujo de vapor Sección II	8,740.55	2. Agua residual	8,740.55
E-800	Tanque de bunker	1. Flujo de bunker	300	1. Flujo de bunker	290
E-900	Tanque de PP	1. Flujo de PP	983.6	1. Flujo de PP	885.24
E-1000	Condensador	1. Vapor saturado	8,740.55	1. Condensados	11,707
		2. Condensados recirculados	2966.45		
E-1100	Bomba	1. Condensados	11,707	1. Condensados	11,707
E-1200	Calentador de condensados	1. Vapor (Calentamiento)	2966.45	1. Condensados (Caldera)	2966.45
		2. Condensado	11,707	2. Condensados recirculados	11,707

En el balance detallado por etapa se observa que en el proceso se producen 983.6 kg de polipropileno por hora que están disponibles para ser aprovechado en la recuperación energética y 11,707 kilogramos de vapor que proporcionan la energía necesaria a la turbina.

Tabla No.27. Balance de masa global de la línea de recuperación energético

	Entradas kg/h		Salidas kg/h
Polipropileno y otros desechos	1036.5	Polipropileno para combustión	885.24
Bunker	300	Polipropileno para almacenar	98.36
Agua de caldera (Condensados)	11707.0	Metales	16.0
		Piedras y otros desechos	15.6
		PVC	10.2
		Vapor sobre calentado	11,707.0
		Pérdidas de masa	311.1
Total	13,043.5		13,043.5

Tabla No.28. Valores obtenidos para las entalpías y flujos de masa referidos a la Figura No.14 del ciclo regenerativo:

	Entalpia (kJ/kg)		Flujo de Masa (kg/h)
H1	827.98	m1	11,707
H2	3414.9	m2	11,707
H3	3003.15	m3	2966.45
H4	2444.91	m4	8740.55
H5	270.36	m5	11,707
H6	284.35	m6	11,707
H7	858.56	m7	2966.45

Tabla No.29. Valores obtenidos para el trabajo referido a la Figura No.13 del ciclo regenerativo:

	Trabajo realizado (kJ/kg)
Bomba	13.99
Sección I Turbina	-411.75
Sección 2 Turbina	-1355.37

Bases Experimentales

A. Datos originales

Tabla No.30. Masa inicial y final para cada molienda realizada con el polipropileno doméstico.

Mesh	Molienda No. 1		Molienda No. 2		Molienda No. 3	
	Masa 1 (g ± 0.05)	Masa 2 (g ± 0.05)	Masa 1 (g ± 0.05)	Masa 2 (g ± 0.05)	Masa 1 (g ± 0.05)	Masa 2 (g ± 0.05)
20	588.2	718.2	588.2	721.9	588.2	738.3
30	574.2	582.9	574.2	586.4	574.2	589.2
45	535.7	537.8	535.7	539.7	535.7	539.6
60	534.3	534.8	534.3	535.2	534.3	535.1
80	542.5	542.9	542.5	543.1	542.5	543.1
100	528.6	528.9	528.6	528.9	528.6	528.9
Finos	668.5	669.3	668.5	669.6	668.5	669.5

Tabla No.31. Datos originales de la masa del solvente, la masa del polipropileno utilizado y el poder calorífico obtenido del polipropileno por la bomba calorimétrica:

Ter-Butanol		
Masa solvente (±0.0001g)	Masa de PP(±0.0001g)	Poder Calorífico (±0.0005 Cal/g)
0.8205	0.4009	4798.9989
0.8174	0.4008	4975.5667
0.8115	0.419	5215.2600
1- Butanol		
Masa solvente (±0.0001g)	Masa de PP(±0.0001g)	Poder Calorífico (±0.0005 Cal/g)
0.8639	0.4108	4981.2271
0.8151	0.4012	5075.8832
0.8243	0.4002	5133.4300
Etilenglicol (PP Doméstico)		
Masa solvente (±0.0001g)	Masa de PP(±0.0001g)	Poder Calorífico (±0.0005 Cal/g)
0.8422	0.4091	5046.2594
0.8861	0.4332	5157.1587
0.8242	0.4039	5183.3623
Etilenglicol (PP Industrial)		
Masa solvente (±0.0001g)	Masa de PP(±0.0001g)	Poder Calorífico (±0.0005 Cal/g)
0.8499	0.4093	5037.5073
0.8169	0.4013	5141.8955
0.809	0.3986	5151.6496

B. Cálculos de muestra

1. **Análisis granulométrico:** El método para determinar el poder calorífico del polipropileno, basado en el manual 457M Calorímetro de Bomba semimicro PAR 6725, requería un tamaño de partícula especial, por lo tanto, se hizo un análisis granulométrico para obtener el tamaño de partícula ideal a ser quemado.

Se desarrolló la molienda del polipropileno doméstico en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala, en el molino de martillos instalado en el laboratorio de operaciones unitarias. Se hicieron tres moliendas y posteriormente se tuvo el tamizaje para obtener el histograma de la granulometría que requería el método de la bomba calorimétrica.

Se determinó la masa final y el porcentaje obtenido en cada plato para las tres moliendas realizadas; el siguiente ejemplo es para el plato del mesh 20 de la primera molienda:

$$Masa\ final = M2 - M1$$

$$\% Masa = \frac{Masa\ en\ el\ plato}{Masa\ total\ de\ los\ platos} * 100$$

$$Masa\ final = 718.2 \pm 0.05 - 588.2 \pm 0.05 = 130 \pm 0.07\ g$$

$$\% Masa = \frac{130 \pm 0.07\ g}{142.8 \pm 0.19\ g} * 100 = 91.03 \pm 0.13\%$$

Se hizo de la misma forma el cálculo para los demás platos en el análisis granulométrico y los resultados se muestran de la Tabla No.28 a 31 en la sección de datos calculados para la parte experimental.

El análisis granulométrico se ejecutó con base al promedio de las tres moliendas realizadas para tener una confiabilidad estadística más acertada del proceso (Tabla No.31). La gráfica se puede observar en la sección de resultados donde se muestra la distribución de las partículas de polipropileno según su tamaño.

2. **Determinación del poder calorífico experimental del polipropileno:** Se desarrolló la determinación del poder calorífico para dos diferentes muestras de polipropileno. La muestra uno correspondía a los desechos domésticos comunes que se puede tener en el hogar (Figura No. 20) y la muestra dos corresponde a polipropileno utilizado en la industria del empaque de baterías (Figura No. 19).

Se partió de los datos obtenidos en el laboratorio del poder calorífico, la masa de solvente y la masa del polipropileno que se muestra en la Tabla No.27. Se contempló una conversión para

las dimensionales del poder calorífico y se determinó la relación en masa de la proporción de polipropileno-solvente como se muestra a continuación, este es un ejemplo para la primera corrida del polipropileno industrial con etilenglicol:

$$\text{Poder Calorífico} = P.C * 1 \frac{\text{kJ}}{238.35 \text{ cal}}$$

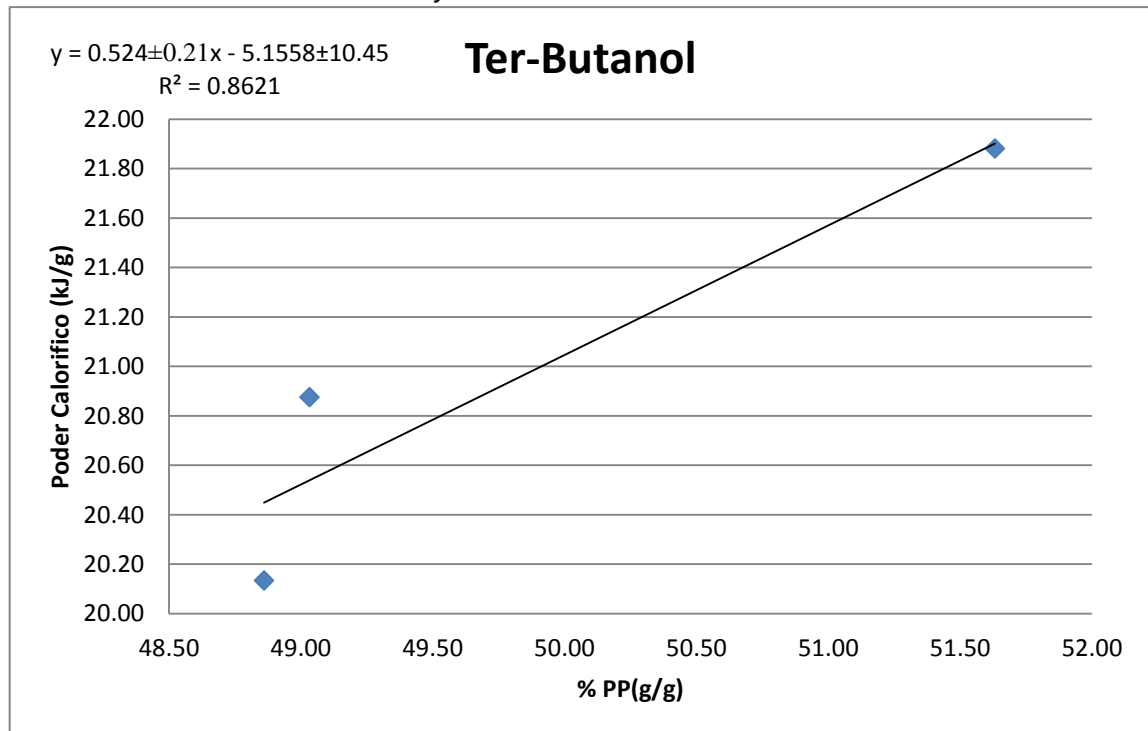
$$\text{Resalción PP - Solvente} = \frac{\text{Masa de PP}}{\text{Masa de Solvente}} * 100$$

$$\text{Poder Calorífico} = 5,037.5073 \pm 0.0005 \frac{\text{cal}}{\text{g}} * \frac{1 \text{kJ}}{238.35 \text{ cal}} = 21.13 \pm 2.09 \times 10^{-6} \frac{\text{kJ}}{\text{g}}$$

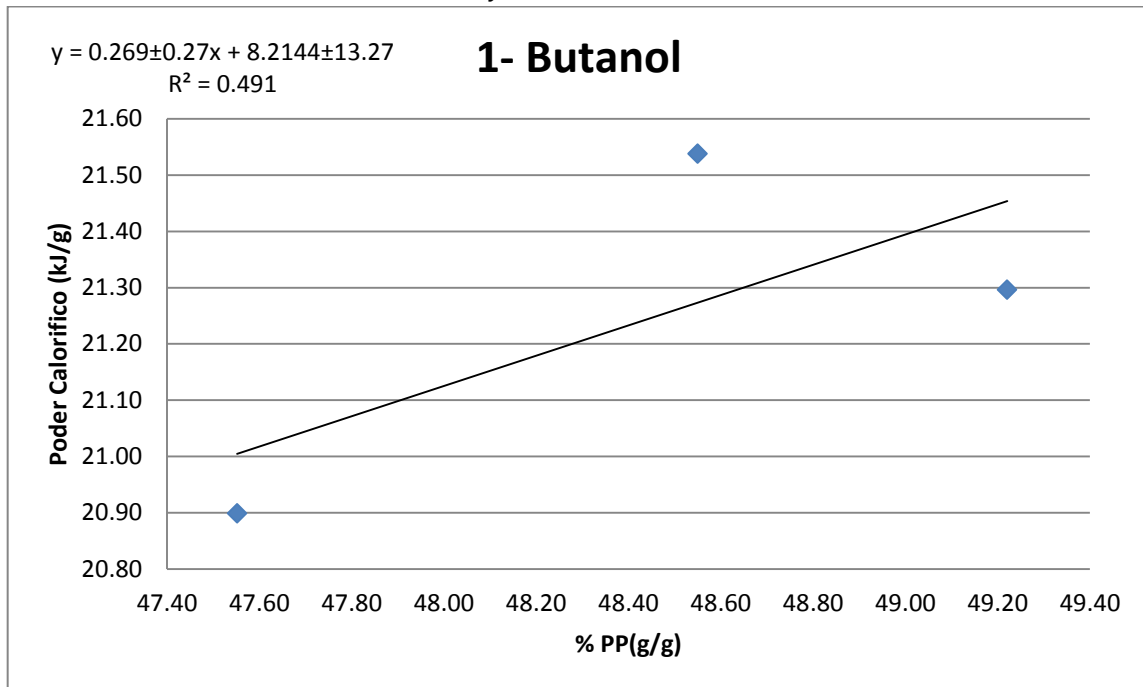
$$\text{Resalción PP - Solvente} = \frac{0.4093 \pm 0.0001}{0.8499 \pm 0.0001} * 100 = 48.16 \pm 0.013\%$$

Como se observa en la Tabla No.27 se utilizó tres diferentes solventes en la experimentación; ter-butanol, 1-butanol y etilenglicol para ayudar a la combustión, sin embargo, se realizó un análisis con un modelo lineal comparando cuál de los tres solventes mostraba una mejor tendencia como se muestra en las siguientes gráficas:

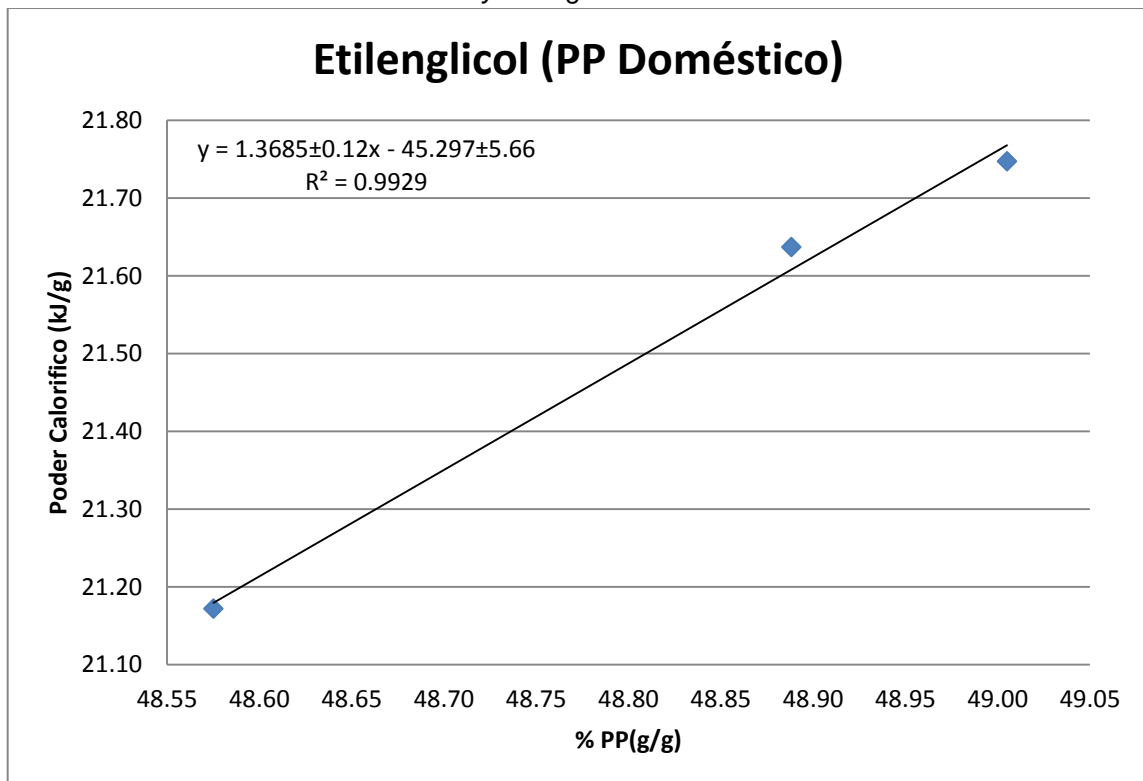
Gráfica No.3: Análisis lineal del poder calorífico en función del porcentaje de polipropileno doméstico y ter-butanol en la muestra.



Gráfica No.4: Análisis lineal del poder calorífico en función del porcentaje de polipropileno doméstico y 1-butanol en la muestra.

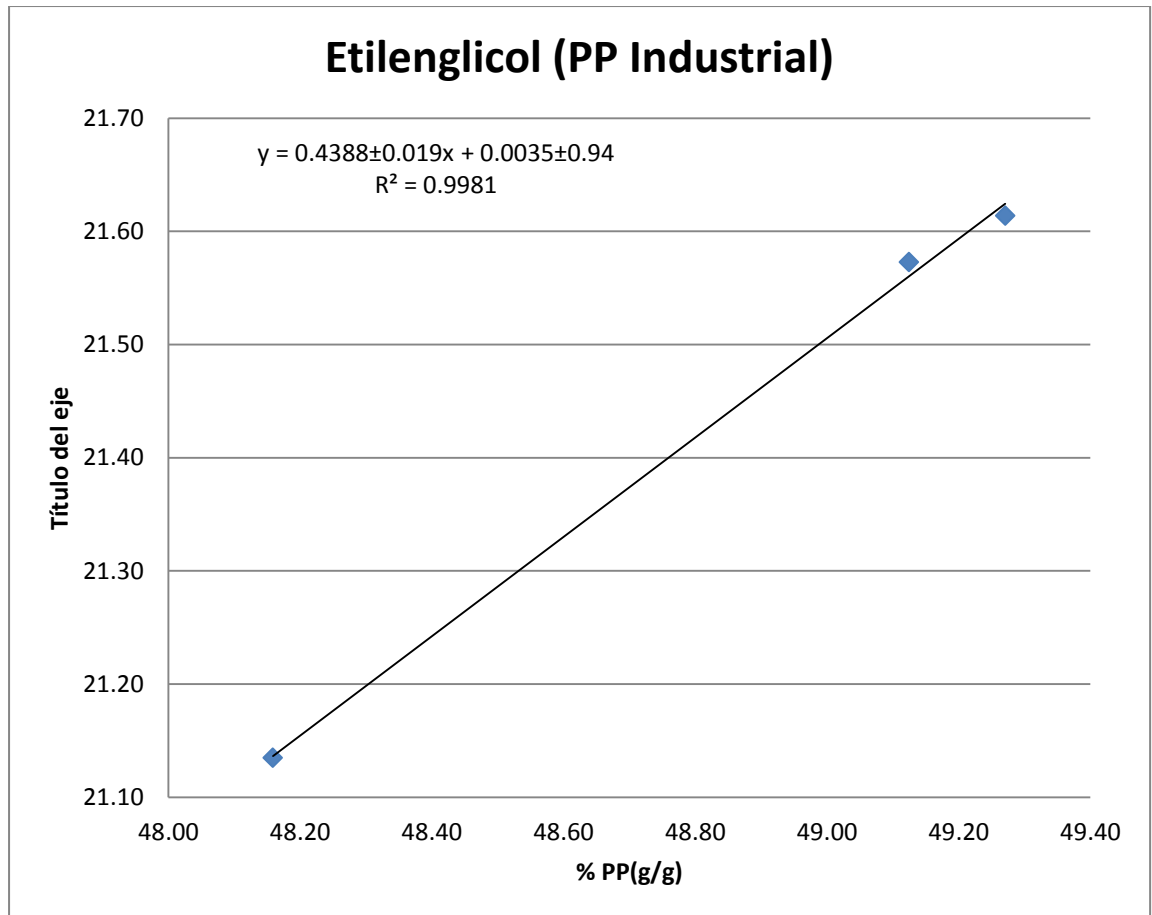


Gráfica No.5: Análisis lineal del poder calorífico en función del porcentaje de polipropileno doméstico y etilenglicol en la muestra.



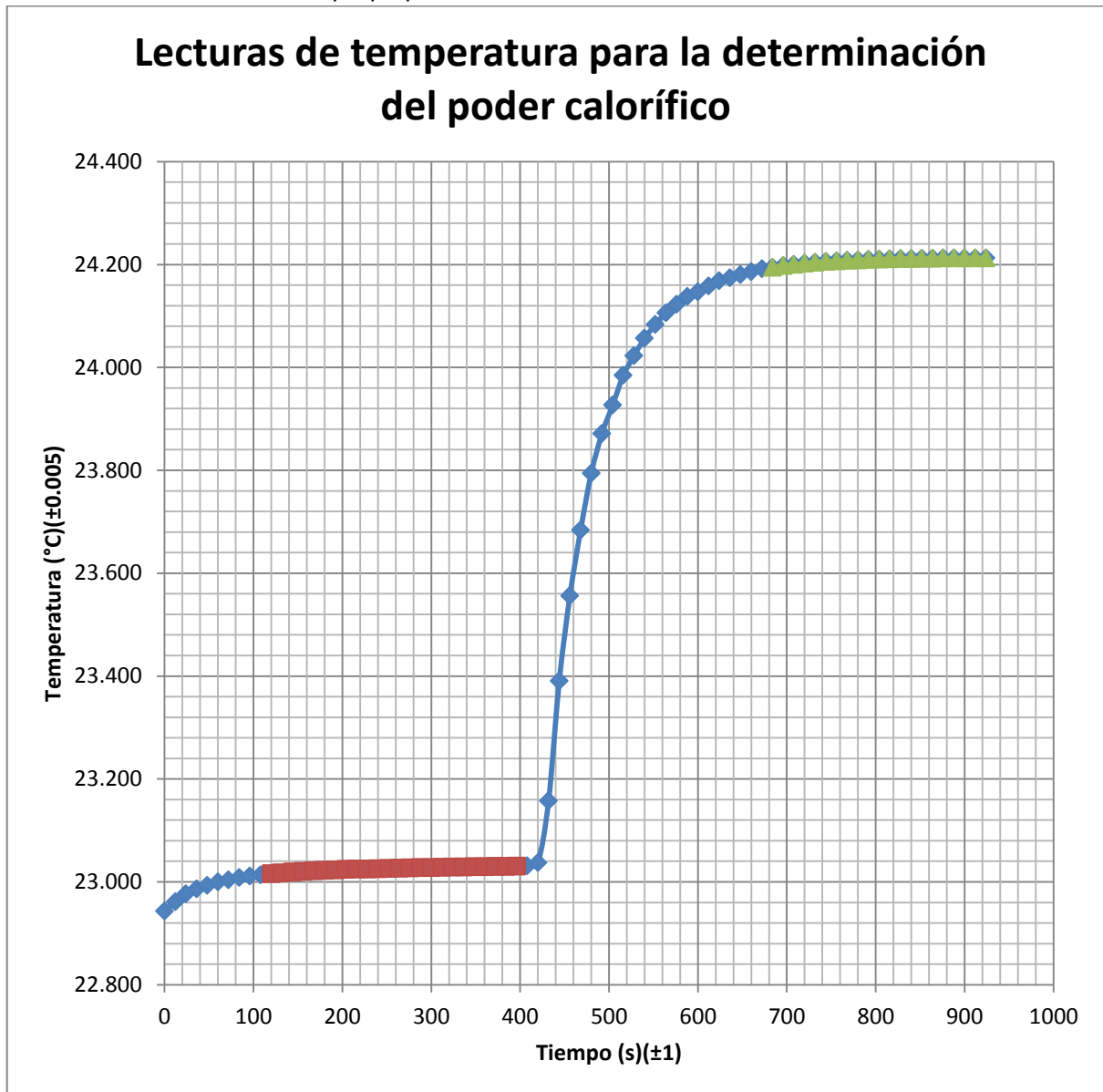
Debido a que el etilenglicol mostró una mejor tendencia en los resultados se procedió a determinar el poder calorífico con dicho solvente para el polipropileno industrial.

Gráfica No.6: Análisis lineal del poder calorífico en función del porcentaje de polipropileno doméstico y etilenglicol en la muestra.



Con base al poder calorífico utilizando etilenglicol como solvente se procedió a determinar el promedio mostrado en la sección de resultados y fue el dato experimental utilizado en el diseño de la línea de recuperación energética.

Gráfica No.7: Promedio del perfil de temperatura para la determinación del poder calorífico del polipropileno doméstico e industrial.



C. Datos calculados:

Tabla No.32. Primera molienda realizada de polipropileno doméstico para la determinación del poder calorífico.

Mesh	Masa final (g± 0.07)	Tamaño mínimo de partícula según mesh (±0.001mm)	% PP molido
20	130	0.853	91.02±0.096
30	8.7	0.599	6.09±0.049
45	2.1	0.354	1.47±0.049
60	0.5	0.251	0.35±0.049
80	0.4	0.178	0.28±0.049
100	0.3	0.152	0.21±0.049
Finos	0.8	Inferior a 0.152	0.56±0.049

Tabla No.33. Segunda molienda realizada de polipropileno doméstico para la determinación del poder calorífico.

Mesh	Masa final (g± 0.07)	Tamaño mínimo de partícula según mesh (±0.001mm)	% PP molido
20	133.7	0.853	87.50±0.087
30	12.2	0.599	7.98±0.046
45	4	0.354	2.62±0.046
60	0.9	0.251	0.59±0.046
80	0.6	0.178	0.39±0.046
100	0.3	0.152	0.20±0.046
Finos	1.1	Inferior a 0.152	0.72±0.046

Tabla No.34. Tercera molienda realizada de polipropileno doméstico para la determinación del poder calorífico.

mesh	Masa final (g± 0.07)	Tamaño mínimo de partícula según mesh (±0.001mm)	% PP molido
20	150.1	0.853	98.23±0.087
30	15	0.599	9.82±0.046
45	3.9	0.354	2.55±0.046
60	0.8	0.251	0.52±0.046
80	0.6	0.178	0.39±0.046
100	0.3	0.152	0.20±0.046
finos	1	Inferior a 0.152	0.65±0.046

Tabla No.35. Promedio de las tres moliendas realizadas de polipropileno doméstico para la determinación del poder calorífico.

Mesh	Masa 1 (g ± 0.07)	Masa 2 (g ± 0.07)	Masa final (g± 0.099)	Tamaño mínimo de partícula según mesh (±0.001mm)	% PP molido
20	588.2	726.1	137.9	0.853	88.55%±0.0016
30	574.2	586.2	12.0	0.599	7.68%±0.0006
45	535.7	539.0	3.3	0.354	2.14%±0.0006
60	534.3	535.0	0.7	0.251	0.47%±0.0006
80	542.5	543.0	0.5	0.178	0.34%±0.0006
100	528.6	528.9	0.3	0.152	0.19%±0.0006
Finos	668.5	669.5	1.0	Inferior a 0.152	0.62%±0.0006

Tabla No.36. Resultados del poder calorífico del polipropileno doméstico utilizando ter-butanol como solvente

Poder Calorífico(kJ/g)	% PP(g/g)
20.13±2.09x10 ⁻⁶	48.86±0.014
20.88±2.17x10 ⁻⁶	49.03±0.014
21.88±2.28x10 ⁻⁶	51.63±0.014

Tabla No.37. Resultados del poder calorífico utilizando 1-butanol como solvente

Poder Calorífico(kJ/g)	% PP(g/g)
20.90±2.09x10 ⁻⁶	47.55±0.013
21.30±2.14x10 ⁻⁶	49.22±0.014
21.54±2.16x10 ⁻⁶	48.55±0.013

Tabla No.38. Resultados del poder calorífico utilizando Etilenglicol como solvente

Poder Calorífico(kJ/g)	% PP(g/g)
21.17±2.09x10 ⁻⁶	48.58±0.013
21.64±2.14x10 ⁻⁶	48.89±0.013 ⁻⁷
21.75±2.15x10 ⁻⁶	49.01±0.014

Tabla No.39. Resultados del poder calorífico utilizando Etilenglicol como solvente

Poder Calorífico(kJ/g)	% PP(g/g)
21.13±2.09x10 ⁻⁶	48.16±0.013
21.57±2.14x10 ⁻⁶	49.12±0.014
21.61±2.15x10 ⁻⁶	49.27±0.014

D. Análisis de error para la experimentación:

Se determinaron las incertidumbres de las gráficas para determinar el error procedente en las estimaciones con los modelos lineales para los cálculos en la experimentación. Como se muestra a continuación se encuentran las tablas utilizadas para determinar la incertidumbre de las ecuaciones del modelo lineal utilizado:

Tabla No.40. Análisis de regresión para la determinación del poder calorífico del polipropileno doméstico con ter-butanol

<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coeficiente de correlación	0.9285							
Coeficiente de determinación	0.8621							
R ² ajustado	0.7241							
Error típico	0.4604							
Observaciones	3							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Medio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	1	1.324724294	1.324724294	6.24954	0.2422459			
Residuos	1	0.21197135	0.21197135					
Total	2	1.536695644						
	Coeficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-5.1558	10.45140398	-0.493309811	0.70825	-137.9535	127.642	-137.953	127.6419
Variable X 1	0.524	0.209621819	2.499908814	0.24225	-2.139462	3.18753	-2.13946	3.187533

Tabla No.41. Análisis de regresión para la determinación del poder calorífico del polipropileno doméstico con 1-butanol

<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coeficiente de correlación	0.7007							
Coeficiente de determinación	0.491							
R ² ajustado	-0.0181							
Error típico	0.3253							
Observaciones	3							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Medio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	1	0.102082079	0.102082079	0.964466334	0.505758			
Residuos	1	0.105843072	0.105843072					
Total	2	0.207925151						
	Coeficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	8.2144	13.26882024	0.619074478	0.647104527	-160.382	176.811	-160.382	176.8107
Variable X 1	0.269	0.27388962	0.982072469	0.505757968	-3.211118	3.74908	-3.21112	3.749077

Tabla No.42. Análisis de regresión para la determinación del poder calorífico del polipropileno doméstico con Etilenglicol

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación	0.9964
Coefficiente de determinación	0.9929
R ² ajustado	0.9857
Error típico	0.0365
Observaciones	3

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Medio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0.185150948	0.185150948	139.1275008	0.0538439
Residuos	1	0.001330801	0.001330801		
Total	2	0.186481748			

	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-45.297	5.664675652	-7.996439223	0.079201738	-117.2738	26.6793	-117.274	26.67929
Variable X 1	1.3685	0.116024216	11.79523212	0.053843879	-0.105695	2.84276	-0.10569	2.84276

Tabla No.43. Análisis de regresión para la determinación del poder calorífico del polipropileno industrial con Etilenglicol

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación	0.999
Coefficiente de determinación	0.9981
R ² ajustado	0.9961
Error típico	0.0165
Observaciones	3

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Medio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0.140667353	0.140667353	518.2333488	0.0279472
Residuos	1	0.000271436	0.000271436		
Total	2	0.14093879			

	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	0.0035	0.941726071	0.00369243	0.997649337	-11.96229	11.9692	-11.9623	11.96924
Variable X 1	0.4388	0.019276397	22.76473915	0.027947202	0.1938923	0.68375	0.193892	0.683752

A continuación se muestran las ecuaciones utilizadas para realizar el análisis estadístico de la experimentación:

Ecuación de la propagación de error para la suma y resta:

$$S_y = \sqrt{(a)^2 + (b)^2} \dots (\text{Skoog, 2001})$$

Ecuación de la propagación de error para la multiplicación y división:

$$S_y = y \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{A}\right)^2 + \left(\frac{b}{B}\right)^2 + \left(\frac{c}{C}\right)^2} \dots (\text{Skoog, 2001})$$

Ecuación de la Media aritmética:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (\text{Skoog, 2001})$$

Ecuación del límite de confianza al 95%:

$$\text{límite de confianza} = \bar{x} \frac{ts}{\sqrt{N}} \quad (\text{Skoog, 2001})$$

Ecuación para la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N}}{N-1}} \quad (\text{Skoog, 2001})$$

Muestra de cálculo para la propagación de error para obtener la masa final en el plato del mesh 20 para la primera corrida del análisis granulométrico en la experimentación:

$$S_y = \sqrt{(0.05)^2 + (0.05)^2} = \pm 0.07 \text{ g}$$

Se tuvo el mismo cálculo para las demás propagaciones de error de sumas y restas en la elaboración del presente trabajo de graduación.

Muestra de cálculo para la propagación de error de multiplicación y división en la determinación del poder calorífico del polipropileno con ter-butanol como solvente en la primera corrida

$$S_y = 20.13 * \sqrt{\left(\frac{0.0005}{4798.9989}\right)^2} = \pm 2.09 \times 10^{-6} \text{ kJ/g}$$

Se elaboró el mismo cálculo para las demás propagaciones de error de multiplicación y división en la elaboración del presente trabajo de graduación.

Se obtuvo la media, el intervalo de confianza y la estadística descriptiva para la determinación del poder calorífico con la herramienta de Excel como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla No.44. Estadística descriptiva para la determinación del poder calorífico del polipropileno industrial utilizando como solvente etilenglicol.

<i>Determinación del poder calorífico industrial</i>	
Media	21.440532
Error típico	0.15326382
Mediana	21.5728781
Moda	#N/A
Desviación estándar	0.26546072
Varianza de la muestra	0.07046939
Curtosis	#¡DIV/0!
Coefficiente de asimetría	-1.68585753
Rango	0.47888525
Mínimo	21.1349163
Máximo	21.6138016
Suma	64.321596
Cuenta	3
Nivel de confianza(95.0%)	0.65944099

Tabla No.45. Estadística descriptiva para la determinación del poder calorífico del polipropileno domiciliar utilizando como solvente etilenglicol.

<i>Determinación del poder calorífico domiciliar</i>	
Media	21.5184678
Error típico	0.176296033
Mediana	21.63691504
Moda	#N/A
Desviación estándar	0.305353687
Varianza de la muestra	0.093240874
Curtosis	#¡DIV/0!
Coefficiente de asimetría	-1.482907774
Rango	0.575216698
Mínimo	21.17163583
Máximo	21.74685253
Suma	64.5554034
Cuenta	3
Nivel de confianza (95.0%)	0.758540609

E. Figuras para la experimentación:

A continuación se muestran algunas fotografías tomadas en la experimentación de la molienda y tamizaje de la muestra:

Figura No. 15: Desecho de polipropileno doméstico antes de la molienda



Figura No. 16: Desecho de polipropileno doméstico después de la molienda



Figura No. 17: Problemas con la molienda del polipropileno



Figura No. 18: Tamizaje del polipropileno reducido para obtener las partículas del mesh 60



A continuación se muestran algunas figuras de la determinación del poder calorífico del polipropileno en la experimentación:

Figura No. 19: Muestra de polipropileno industrial obtenido de los empaques de baterías.



Figura No. 20: Muestra de polipropileno doméstico.



Figura No. 21: Bomba calorimétrica y termómetro PAR y sistema de presurización con oxígeno.



Figura No. 22: Problemas con la experimentación al utilizar ácido benzoico en lugar de solventes líquidos

