

ANÁLISIS DE COMPENSACIÓN DE EMISIONES DE CO₂ POR MEDIO DE UN PROYECTO DE RECICLAJE DE PET EN ENKA DE COLOMBIA

KATHERINE HADAD LÓPEZ

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
MEDELLÍN
2015**

**ANÁLISIS DE COMPENSACIÓN DE EMISIONES DE CO₂ POR MEDIO DE UN
PROYECTO DE RECICLAJE DE PET EN ENKA DE COLOMBIA**

KATHERINE HADAD LÓPEZ

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero de Procesos

**Asesor
ALEJANDRO ÁLVAREZ
Ingeniero de Procesos**

**Co-asesora
XANA VILLA
Licenciada en Ciencias Ambientales**

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
MEDELLÍN
2015**

NOTA DE ACEPTACIÓN

ASESOR

JURADO

JURADO

CIUDAD Y FECHA.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a la Universidad EAFIT por hacer posible la realización de este proyecto. A Enka de Colombia S.A. por el apoyo dado para la realización de la investigación, en especial a Aníbal Celis.

Agradezco a los asesores Alejandro Álvarez y Xana Villa por su direccionamiento e incondicional apoyo durante toda la investigación.

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	11
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. Antecedentes	14
2.2. Gases de efecto invernadero	15
2.3. Centrales termoeléctricas	16
2.4. Reciclaje PET	17
2.5. Metodologías para medir emisiones CO ₂	19
3. OBJETIVOS	21
3.1. Objetivo general	21
3.2. Objetivos específicos	21
4. HIPÓTESIS	22
5. METODOLOGÍA	23
5.1. Alcances y límites operacionales	23
5.2. Metodología de cálculo	25
5.3. Factores de emisión utilizados	27
6. INVENTARIO DE EMISIONES Y RESULTADOS	28
6.1. Escenario 1	28

	pág.
6.2. Escenario 2	33
6.3. Escenario 3	40
7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	51
7.1. Escenario 1	51
7.2. Escenario 2	53
7.3. Escenario 3	54
7.4. Comparación de los escenarios	57
8. CONCLUSIONES	60
9. RECOMENDACIONES	61
10. BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	67

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Factores de emisión utilizados	27
Tabla 2. Datos entrada proceso fibra corta	30
Tabla 3. Resultados obtenidos Entradas al proceso escenario 1	32
Tabla 4. Resultados obtenidos transporte PET virgen	32
Tabla 5. Resultados obtenidos Energía escenario 1	32
Tabla 6. Resultados obtenidos Emisiones totales escenario 1	33
Tabla 7. Datos entrada proceso de reciclaje PET	36
Tabla 8. Resultados obtenidos entradas al proceso	37
Tabla 9. Resultados transporte botellas PET recicladas	37
Tabla 10. Resultados Energía producción de gránulo reciclado	38
Tabla 11. Resultados tratamiento residuos	38
Tabla 12. Resultados emisiones totales producción de gránulo virgen	38
Tabla 13. Resultados entradas al proceso de fibra corta escenario 2	39
Tabla 14. Resultados energía para el escenario 2	39
Tabla 15. Resultados emisiones totales para el escenario 2	39
Tabla 16. Datos de entrada de materias primas a la carboeléctrica	42

	pág.
Tabla 17. Resultados materias primas carboeléctrica	44
Tabla 18. Resultados transporte carboeléctrica	45
Tabla 19. Datos gases de combustión a la salida de la chimenea	45
Tabla 20. Composición gases de combustión	46
Tabla 21. Fracción másica gases de combustión	46
Tabla 22. Flujo másico gases de combustión	47
Tabla 23. Resultado gases de combustión CO ₂ carboeléctrica	47
Tabla 24. Resultados factor de emisión carboeléctrica	48
Tabla 25. Resultados energía proceso de producción resina de PET reciclada escenario 3	49
Tabla 26. Resultados energía proceso de producción resina de PET reciclada escenario 3	49
Tabla 27. Resultados entradas procesos de fibra corta escenario 3	50
Tabla 28. Resultados energía proceso fibra corta escenario 3	50
Tabla 29. Resultados emisiones totales escenario 3	50

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Mapa de emisiones	25
Ilustración 2. Mapa de proceso escenario 1	28
Ilustración 3. Mapa de proceso escenario 2	34
Ilustración 4. Mapa de proceso escenario 3	40
Ilustración 5. Porcentaje de emisiones escenario 1	51
Ilustración 6. Porcentaje de emisiones escenario 2	53
Ilustración 7. Porcentaje de emisiones carboeléctrica	54
Ilustración 8. Porcentaje de emisiones escenario 3	55
Ilustración 9. Porcentaje de emisiones escenario 3	57
Ilustración 10. Comparación de emisiones KG CO ₂ e	58
Ilustración 11. Diferencia de emisiones de emisiones KG CO ₂ e	59

RESUMEN

Esta investigación evalúa el impacto ambiental del proceso de producción de fibra corta en Enka de Colombia teniendo en cuenta tres escenarios diferentes, utilizando la metodología establecida en el Greenhouse Gas Protocol Standard. Generando una comparación entre dichos escenarios con el fin de evaluar si hay una compensación entre las emisiones que se generan por el uso de una carboeléctrica y las emisiones que se pueden ahorrar mediante el reciclaje de botellas PET.

A partir de lo anterior se realiza un inventario de análisis de ciclo de vida donde se evalúan las emisiones asociadas a la producción de materias primas, transporte, consumo de energía y residuos para cada escenario.

Con el desarrollo de este proyecto se logra concluir que sí hay una reducción de emisiones por el reciclaje de botellas PET, reduciendo las emisiones de CO₂e aproximadamente un 15.4%

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que el consumo de plástico en la sociedad crece en un 4% anualmente (Arandes, 2004), su uso se ha extendido en el campo de los envases y en la fabricación de componentes en las industrias. Así el consumo mundial de materiales plásticos ha pasado de los 10 millones de toneladas en 1978 hasta los 60 millones en el año 2000 (Arandes, 2004, p. 28),

Los plásticos causan problemas de contaminación, produciendo grandes emisiones de CO₂ en su producción, al ser quemados, contaminando ríos y mares al ser desechados inadecuadamente. El CO₂ es el principal gas de efecto invernadero en la atmosfera (IPCC, 2007, p. 2) y el principal gas responsable del cambio climático, contribuyendo a problemas ambientales, grandes impactos en la sociedad, la economía y los ecosistemas (Espindola, 2012, p. 1). El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ha advertido que el riesgo del cambio climático es contundente y que su impacto puede aumentar las temperaturas en 2°C por encima de las registradas en la época de la preindustrial (EPA, 2010), produciendo un incremento en la evaporación de las zonas ecuatoriales, un aumento en la nubosidad llevando a la reducción de la cantidad de radiación solar (Espindola, 2012, p. 1). Esta problemática ha llevado a que la mayoría de países busquen solución para disminuir los índices de contaminación en el planeta.

En la década pasada comenzó a utilizarse masivamente el PET debido a su propiedad como barrera de los gases, su bajo peso y la seguridad de los usuarios ante una rotura, siendo estos factores fundamentales para la generalización de su uso como envase de bebidas gaseosas y posteriormente de otros productos (Hachi & Rodríguez, 2010, p. 35).

En el año 2011, el consumo mundial de PET botellas llegó a 16.7 millones de toneladas (Enka de Colombia, 2012, p. 4).

En el mundo se recicla cerca de 46% del PET, su uso principal es la fibra corta. Los países más avanzados en reciclaje se caracterizan por tener regulaciones para incentivar la recolección y redes aseguradas para asegurar el flujo del material (Enka de Colombia, 2012, p. 6). Con la resina de PET reciclado se pueden reducir hasta en un 72% las emisiones de CO₂ si se compara con el impacto generado por la producción de resina virgen (Eko, Enka de Colombia, 2012). En Colombia se recicla aproximadamente el 23% de PET botellas, siendo uno de los países con menos reciclaje anual de PET, con respecto a otros países como Brasil donde se recicla el 55% de PET botellas o Argentina donde se reciclan aproximadamente el 34%, el país donde más se recicla PET botellas anuales es Japón, reciclando cerca del 77% (Ortega, 2011, p. 22).

Enka es una empresa Colombiana productora de nylon, poliéster inteligente, hilos, microfibras y resinas con base en insumos petroquímicos, lo cual genera emisiones de CO₂, que se ven compensadas en parte por el proyecto de reciclaje de PET, donde se reciclan aproximadamente 34.000 toneladas de gránulo por año, reduciendo las emisiones CO₂ producidas por la empresa (Enka de Colombia, 2012, p. 21). Actualmente Enka está haciendo uso de carbón como fuente de energía produciendo como factor primario electricidad, supliendo con esta hasta el 90% de energía en los procesos productivos (Enka de Colombia, 2014).

Con este trabajo se pretende hacer un análisis de comparación relativo a las emisiones de CO₂ generadas en la carboeléctrica, y las emisiones que se mitigan a partir del reciclaje PET, en el proceso productivo de la empresa, para esto se ha escogido como proceso específico la producción de fibra corta a partir de resina de

PET, la cual hasta el 2009 se fabricaba a partir de resina de virgen, pero a partir del año 2009 se empezó a fabricar con resina de PET reciclada, utilizando energía proveniente de EPM; como se mencionó anteriormente desde el año 2014 Enka está haciendo uso de una carboeléctrica como fuente de energía para sus procesos, debido a esto actualmente el proceso de fibra corta se realiza a partir de resina de PET reciclada utilizando dicha energía para su fabricación, por lo cual se evaluarán los diferentes procesos para la fabricación de fibra corta. De esta manera se quiere definir si el balance entre las emisiones de CO₂ generadas por la carboeléctrica y las ahorradas en el proceso de producción de reciclaje PET de la empresa resulta en un impacto neto positivo o negativo con respecto al cambio climático.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

El análisis de ciclo de vida se formuló como causa de la crisis energética, en cuanto a la preocupación ambiental del destino de los residuos industriales, también como planificación económica del análisis insumo-producto, el cual se aplicó a problemas ambientales durante los años setenta (Abarca, 2015, p. 2).

Durante los años setenta, los aspectos ambientales tomaron un papel importante debido a la degradación ambiental, produciéndose así la necesidad de la medición de impactos ambientales causados por las actividades humanas en la producción y manufacturación de productos, esta metodología fue utilizada para llevar los requisitos de recursos, la carga ambiental de emisiones en el aire, agua y la producción de residuos. En 1969, la empresa Coca Cola, financia uno de los primeros estudios para comparar recipientes de bebidas y así determinar cual tenía el menor impacto para el medio ambiente, así mismo el menor consumo de recursos naturales (Abarca, 2015, p. 3).

En 1997 la Organización de Naciones Unidas realizó el protocolo de Kyoto sobre el cambio climático, con el fin de acordar medidas y compromisos para la reducción de gases de efecto invernadero consecuencia de las actividades industriales. En esta reunión 159 países acordaron en disminuir la cantidad de dióxido de carbono, metano y óxido nítrico, acordando como una de las medidas el reciclaje de materiales plásticos (Hachi & Rodríguez, 2010, p. 16).

Hoy en día el análisis de inventario de ciclo de vida continua siendo una metodología mejorada, la cual es utilizada para realizar estudios para la medición

de los impactos ambientales de los gases de efecto invernadero acordados en el protocolo de Kyoto y de esta manera buscar nuevas soluciones y alternativas para mitigar las emisiones generadas por estos.

2.2. Gases de efecto invernadero

Las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) tratadas en el protocolo de Kyoto aumentaron en un 70% entre el año 1970 y el año 2004 (IPCC, 2005, p. 16). El dióxido de carbono (CO_2) es el gas de efecto invernadero que ha tenido el mayor aumento de sus concentraciones en la atmósfera, hasta finales del siglo XVIII tuvo concentraciones de 280 ppm y ahora rondan en 400 ppm (Global Climate Change, 2015). La mayor parte de crecimiento de las emisiones de CO_2 proviene de la generación de energía y transporte terrestre (IPCC, 2005, p. 5).

Las emisiones de metano (CH_4) han aumentado debido a la expansión de la agricultura industrial y el uso de combustibles fósiles. Las emisiones de óxido nitroso (N_2O) aumentaron por el uso de fertilizantes y crecimiento agrícola. Otros gases GEIS como los clorofluorocarbonados (CFC) e hidroclorofluorocarbonados (HCFC) aumentaron desde 1970 hasta 1990 7.5 Gigatoneladas de CO_2 equivalente (GtCO_2e), pero luego lograron disminuir hasta 1.5 GtCO_2e en 2004, se pronostica que continúen disminuyendo ya que cada vez tienen un menor uso en los países desarrollados (IPCC, 2005, p. 5).

El impacto de estos gases se representa en términos de CO_2 equivalente (CO_2e). Esto combina todos los gases en un número basado en su efecto de calentamiento global, es decir, 1 kg de CO_2 representa 1 kg CO_2e , pero 1 kg de CH_4 representa 25 kg CO_2e , cada uno de los GEIS representa un valor diferente en términos de CO_2e . (IPCC, 2007, p. 141).

El aumento de las concentraciones de los GEIS causa el aumento de la temperatura de la troposfera y facilita la acidificación de los océanos (Kline, 2008).

El aumento de la temperatura de la troposfera causa cambios en los patrones de vientos, nubosidad y lluvias, además aumenta el derretimiento de aguas congeladas en polos y montañas. Al aumentar la temperatura del océano se eleva el nivel del mar por expansión térmica, además de modificar la circulación termohalina (también afectada por cambios en salinidad derivados de cambios de precipitaciones) que transportan calor a lo largo del planeta (IPCC, 2013, p. 15).

2.3. Centrales termoeléctricas

Como se mencionó anteriormente el hombre ha generado con sus actividades cotidianas un aumento en las emisiones de CO₂, con la explotación de combustibles fósiles para la generación de energía utilizada para diferentes procesos industriales.

Para algunos de estos procesos se utilizan centrales que usan un combustible como fuente de energía para la generación de energía eléctrica, que a su vez, produce electricidad como producto primario, y calor como producto secundario, este último en centrales de vapor, en cantidades mayores que el producto primario (Fernandez, 2015, p. 6).

La contribución a la generación por parte de combustibles líquidos ha caído a niveles muy bajos y la casi totalidad de esta generación se realiza a partir de carbón y gas natural (Green Cross Argentina, 2010, p. 11).

Para el año 2002 la energía consumida del sector industrial en Colombia provino en un 41% del carbón, el 33 % del gas, 18% del diesel y 7% del Fuel Oil, siendo así el carbón responsable del 65% de las emisiones de fuentes fijas

(establecimientos industriales y termoeléctricas) (Ministerio de Ambiente y Vivienda, 2005, p. 3).

Estas emisiones procedentes de fuentes fijas son el resultado de la liberación de carbono durante la combustión. Durante este proceso la mayor parte del carbono se emite como CO₂ de forma inmediata, estas emisiones de CO₂ dependen del contenido de carbono del combustible. Sin embargo una parte de este carbón se libera en forma de monóxido de carbono, metano y compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano, estos se oxidan convirtiéndose en CO₂ en la atmosfera, este proceso puede tardar desde unos pocos días hasta aproximadamente 12 años (IPCC, 2015, p. 3).

La generación de energía por medio de centrales térmicas aporta un gran porcentaje de emisiones atmosféricas en el país, causando efectos de contaminación en el ambiente y la insostenibilidad en la explotación de los recursos naturales (Ministerio de Ambiente y Vivienda, 2005, p. 3).

Una de las estrategias para la reducción de emisiones de gases CO₂ utilizadas en la industria es mediante los procesos de reciclaje de materiales plásticos.

2.4. Reciclaje PET

El reciclaje de materiales plásticos nace como una nueva solución para la conservación y protección de los ecosistemas, tomando así los desechos de dichos materiales utilizándolos para la elaboración de nuevos bienes (Gutierrez, 2015, p. 1).

Los países con mayores tasas de reciclaje están en Europa y Asia, con países que logran superar el 30%, a diferencia de América Latina que tiene cifras muy bajas.

De esta manera se observa el daño ambiental que se está generando en la región (Gutiérrez, 2015, p. 2).

Uno de los materiales plásticos que causa un gran daño al ambiente es el polietilentereftalato (PET), el cual sirve para hacer empaques, láminas y botellas, este puede tardar hasta 100 años para degradarse. Sin embargo debido a su reciclaje se pueden producir otros bienes, conservando sus propiedades (Gutiérrez, 2015, p. 5).

En la década pasada, comenzó a utilizarse masivamente el PET. Una de sus propiedades más distintivas, como es la barrera de gases, le confirió gran difusión como envase de bebidas gaseosas, sifones y posteriormente otros productos como envase para aceites, mayonesas, cosméticos, etc. Pero no sólo estas propiedades influyeron para esta elección de los industriales y el público consumidor. Su escaso peso en relación al del producto adquirido, aproximadamente 50 veces menos que el líquido contenido y fundamentalmente la seguridad de los usuarios, ante una eventual rotura, fueron factores determinantes para la generalización de sus usos (Instituto Tecnológico Superior, 2010, p. 10).

El reciclaje PET se proyecta como parte fundamental del boom ambiental que se vive actualmente siendo uno de los plásticos más reciclados en el mundo, convirtiéndose en una de las mayores oportunidades para la industria del plástico. Muchas compañías están invirtiendo en maquinaria y tecnología para dar uso al PET reciclado. Brasil es el líder en todo el continente latinoamericano en su uso final, seguido por México y Argentina (Ortega, 2011, p. 15).

En Colombia grandes empresas como Coca cola, Pepsi y Postobón, quieren lograr para el año 2020 que el 50% de las botellas sean producidas con PET reciclado, de esta manera una botella será fabricada con 50% de PET virgen y el otro 50% con PET reciclado (Gutiérrez, 2015, p. 3).

Con el reciclaje de PET se logra una reducción en las emisiones de CO₂ ahorrando emisiones en los procesos de producción a través de la explotación de combustibles fósiles, esta es una de las estrategias que se promueven en las empresas para la compensación de emisiones CO₂ en sus procesos productivos, de esta manera generan un desarrollo sostenible para el ambiente.

2.5. Metodologías para medir emisiones CO₂e

Para conocer la contribución de las empresas con la mitigación de emisiones CO₂ se utilizan metodologías como análisis de ciclo de vida, inventario de gases de efecto invernadero, huella de carbono, entre otras, las cuales son estrategias que permiten cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero, conociendo los sectores de mayor contribución con sus emisiones al cambio climático (Ministerio de Ambiente Chile, 2015, s.p.).

Estas herramientas sirven para medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de su ciclo de vida (desde que se obtiene las materias primas hasta su fin de vida). Estos se basan en la recopilación de las entradas y salidas del sistema para obtener los resultados que muestran sus impactos ambientales potenciales. Las metodologías se basan en un enfoque holístico, todas las propiedades de un sistema deben ser determinadas de manera individual por las partes que lo componen (Secretaría Distrital de Ambiente, 2013, p. 2).

Para el alcance del sistema se deben tener en cuenta elementos de entradas y salidas al sistema como el uso de recursos, materias primas, transporte, productos, energía, emisiones al aire, al agua, y al suelo, también subproductos del sistema, entre otros (Secretaría Distrital de Ambiente, 2013, p. 4).

También se deben categorizar las fuentes de emisión dentro del alcance del sistema definido. Las clasifica de la siguiente manera (IPCC, 2015, p. 5).

- Fuentes fijas o estacionarias: emisiones correspondientes a quema de combustibles en equipos estacionarios como generadores o calderas.
- Fuentes móviles: quema de combustibles en equipos móviles como camiones, grúas, barcos.
- Emisiones de proceso: emisiones correspondientes a procesos químicos.

La norma ISO 14040, Greenhouse Gas protocol Standard, PAS 2050, entre otras detallan los requisitos para llevar a cabo el uso de cualquiera de las metodologías, tratando los impactos ambientales como lo son la utilización de recursos y las consecuencias ambientales de las emisiones a lo largo de todo su ciclo de vida, pasando por la adquisición de materia prima, producción, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Establecer si hay una compensación de CO₂e en el proceso de manufactura de fibra corta, entre las emisiones generadas por la carboeléctrica y las ahorradas mediante el reciclaje PET en Enka de Colombia.

3.2. Objetivos específicos

- Calcular las emisiones de CO₂e totales relativas al proceso de fibra corta a partir de resina de PET virgen utilizando como fuente de energía una red hidroeléctrica.
- Determinar las emisiones de CO₂e relativas al proceso de fibra corta a partir de resina de PET reciclada utilizando como fuente de energía una red hidroeléctrica.
- Determinar las emisiones de CO₂e relativas al proceso de fibra corta a partir de resina de PET reciclada utilizando como fuente de energía una carboeléctrica.

4. HIPÓTESIS

Se prevé que el porcentaje de las emisiones generadas por la carboeléctrica sea mayor al porcentaje de las emisiones ahorradas mediante el proceso de reciclaje PET, por lo que no se encuentra una compensación total en las emisiones generadas en el proceso productivo en Enka de Colombia.

5. METODOLOGÍA

Para determinar las emisiones de CO₂e generadas en la carboeléctrica, determinar las emisiones de CO₂e generadas en el proceso de producción del PET, y determinar las emisiones de CO₂e que se pueden ahorrar mediante un proyecto de reciclaje PET, se realizara un análisis de ciclo de vida, en el cual se pretende medir el impacto ambiental en las emisiones causadas por la producción de fibra corta a partir de resina de PET virgen con energía proveniente de EPM y la producción de fibra corta a partir de PET reciclado con energía proveniente de la carboeléctrica.

Para esto se seguirá el Greenhouse Gas Protocol Standard para análisis de ciclo de vida, el cual ha sido desarrollado por el instituto de recursos mundiales y el consejo mundial sobre el desarrollo sostenible. Este es un estándar global para la forma de medir, administrar y reportar las emisiones de gases de efecto invernadero (Greenhouse Gas Protocol, 2015, p. 1).

5.1. Alcances y límites operacionales

Se definieron los siguientes escenarios para dar cumplimiento a la metodología:

- Escenario 1:

Se considera el ciclo de vida de producción de fibra corta a partir de resina de PET virgen, donde se evaluarán todas las entradas y salidas del proceso con energía proveniente de EPM para establecer los kilogramos de CO₂e al proceso.

- Escenario 2:

Se considera el ciclo de vida de producción de fibra corta a partir de resina de PET reciclada, teniendo en cuentas las entradas y salidas de dicho proceso, de esta manera se podrá evaluar el ahorro con respecto al proceso de fibra corta con PET virgen, mediante el uso de energía de EPM.

- Escenario 3:

Se considera el mismo ciclo de vida anterior, pero en este se evaluarán las entradas y salidas del proceso teniendo en cuenta que la energía proveniente es a partir de la carboeléctrica, de esta manera se comprobará si existe un aumento en las emisiones con respecto al escenario 2.

En este caso también se siguen los tres alcances que la metodología establece:

Alcance 1. Emisiones directas: Dentro de esta categoría se encuentran las emisiones que se generan en la realización de la actividad y que son controladas por la empresa. Para cada uno de los escenarios se incluye las emisiones asociadas al proceso de fibra corta y la generación de energía de la carboeléctrica.

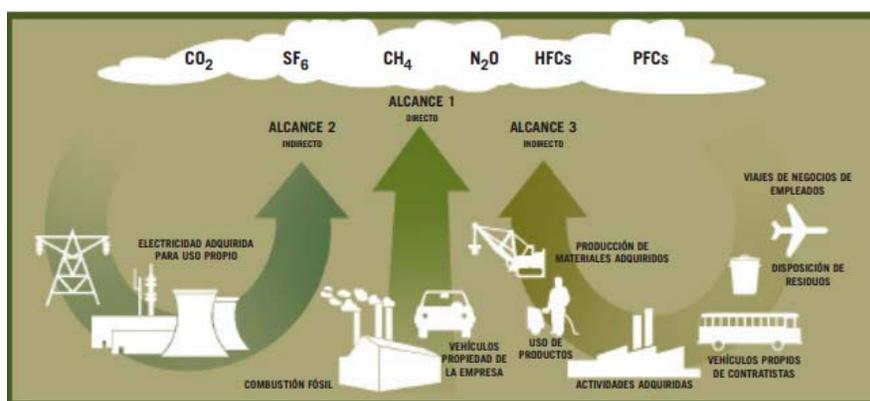
Alcance 2. Emisiones indirectas asociadas a la electricidad: Estas emisiones son aquellas de fuentes que no se pueden controlar, en este alcance en específico de las emisiones generadas por la electricidad que es comprada por la empresa. En el caso particular de la energía que se adquiere por EPM en los escenarios 1 y 2.

Alcance 3. Otras emisiones indirectas: El alcance 3 son las emisiones inducidas por la actividad, por lo que no se tiene un control directo sobre estas. Para el

proyecto serán tomadas en cuenta las emisiones de la producción de la materia prima y el transporte de estas.

De acuerdo a los alcances de emisión especificados anteriormente, el mapa de emisiones que alcanza la huella de carbono es el siguiente:

Ilustración 1. Mapa de emisiones



Fuente: Guía GHG Protocol

5.2. Metodología de cálculo

Para los cálculos de las emisiones de CO₂e al proceso de fibra corta para cada uno de los tres escenarios se necesita: datos del proceso y factores de emisión. Para los datos de los procesos se requieren entradas y salidas involucrados en el ciclo de vida del producto y la energía involucrada en cada uno de estos y los factores de emisión para convertir estas cantidades en emisiones de gases de efecto invernadero.

Los datos de los procesos son adquiridos por la empresa Enka de Colombia y los factores de emisión provienen principalmente de los datos más actuales

publicados por ECOINVENT, DEFRA (2015), EUROPLASTIC, COPERT y para la energía de EPM se utilizó un factor de emisión del último informe de sostenibilidad de empresas públicas de Medellín (EPM). En el caso de la carboeléctrica se encontró el factor de emisión teniendo en cuenta todos los datos brindados por Enka de Colombia para encontrar las emisiones asociadas a la explotación de las materias primas, el transporte y los residuos que se producen durante la operación.

La unidad utilizada para el cálculo ha sido $\text{kgCO}_2\text{e/h}$, que incluye las emisiones CO_2 y las emisiones equivalentes de otros gases de efecto invernadero como el metano (CH_4), el óxido nitroso (NO_2), el hexafluoro de azufre (SF_6) los perfluorocarbonos (PFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC).

5.3. Factores de emisión utilizados

Los factores de emisión utilizados fueron adquiridos de datos globales, con el objetivo de llegar a un resultado final lo más cercano posible a la realidad, debido a que no se encontraron factores de emisión para Colombia.

Tabla 1. Factores de emisión utilizados

FACTORES DE EMISIÓN			
ACTIVIDAD	FE	UNIDADES	FUENTE
MINERÍA- TRATAMIENTO MATERIAS PRIMAS			
Carbón minería	0.42984	kg CO ₂ e	ECOINVENT ¹
Caliza minería- trituración	0.00578	kg CO ₂ e	ECOINVENT
Chamote trituración (ladrillo triturado)	0.00478	kg CO ₂ e	ECOINVENT
Agua tratamiento	0.000266	kg CO ₂ e	ECOINVENT
Producción gránulo PET virgen	2.15	kg CO ₂ e	PLASTICSEUROPE ²
Avivajes (aceite mineral)	2.85441	kg CO ₂ e	ECOINVENT
Soda Cáustica	1.23	kg CO ₂ e	ECOINVENT
TRANSPORTE POR CARRETERA			
Camiones llenos 16-32 toneladas	0.1700	kg CO ₂ e/ km*ton	ECOINVENT
Camiones vacíos	0.090	kg CO ₂ e/ km*ton	COPERT ³
TRANSPORTE MARÍTIMO			
Barco 5000-1000 toneladas	0.015	kg CO ₂ e	DEFRA ⁴
ENERGÍA			
Energía EPM	0.018	kgCO ₂ /kWh	INFORME SOSTENIBILIDAD EPM ⁵
RESIDUOS			
Tratamiento de residuos	0.00549	kg CO ₂ e	ECOINVENT

Fuente: Elaboración propia.

¹ ECOINVENT, 2015.

² PlasticsEurope, 2011.

³ Copert 4, 2013.

⁴ DEFRA, 2014.

⁵ EPM, 2014.

6. INVENTARIO DE EMISIONES Y RESULTADOS

A continuación se describen los resultados para los tres escenarios establecidos:

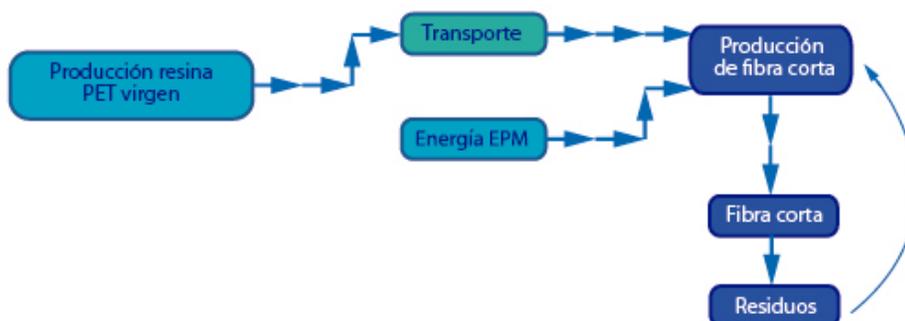
6.1. Escenario 1

Se considera el ciclo de vida de producción de fibra corta a partir de resina de PET virgen, donde se evaluarán todas las entradas y salidas del proceso con energía proveniente de EPM para establecer los kilogramos de CO₂e al proceso.

Mapa de procesos escenario 1

Se presenta el mapa de procesos simplificado para el escenario 1:

Ilustración 2. Mapa de proceso escenario 1



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se especifican las fuentes de emisión tenidas en cuenta para el análisis.

Datos del proceso escenario 1

Datos de Entrada de las materias primas y otros materiales para la producción de fibra corta:

- **Gránulo PET virgen**

El gránulo de PET es proveniente de Corea del sur, para este se ha elegido un factor de emisión donde se contabiliza toda la producción del material virgen, incluyendo la explotación de sus materias primas.

- **Agua**

Para el agua que se requiere para el proceso de producción de fibra corta y los otros procesos de la empresa Enka de Colombia, se ha tenido en cuenta que proviene de la quebrada el Salado y luego pasa por la planta de tratamiento para purificación con filtros de arena y floculador donde se produce el agua industrial para dicho proceso, por esto el factor de emisión utilizado representa la operación para el tratamiento de agua con filtración directa incluyendo la filtración de arena y desinfección.

- **Agua helada**

El agua helada en Enka de Colombia es agua a 6°C, esta es agua recirculada, por lo cual no se contabiliza su consumo, pero si se contabiliza la energía que requieren para pasar el agua de 11°C a 6°C.

- **Avivajes**

Los avivajes son aceites minerales, se encontró un factor de emisión para la producción de aceite mineral.

Los datos han sido proporcionados por la empresa Enka de Colombia:

Tabla 2. Datos entrada proceso fibra corta

Entrada	Cantidad	Unidad
Gránulo PET virgen	820	kg/h
Agua	1000	kg/h
Agua helada	9000	kg/h
Avivajes	3.2	kg/h

Fuente: Elaboración propia.

Datos del transporte:

Se ha tenido en cuenta el dato de transporte de la materia prima desde Corea, por lo que se busco un factor de emisión marítimo de barcos suponiendo una carga entre 5000 y 10000 toneladas en total se calculan 15031 km (Sea-Distances, 2015), también se supone que este llega al puerto de Buenaventura y luego se contabiliza el transporte terrestre de Buenaventura a Girardota del camión con una capacidad de carga de 32 toneladas calculando en total 487 km (Distancias Colombia, 2015), se consideró el regreso del camión vacío desde Girardota a

Buenaventura, donde el factor de emisión se considera con el 44% del factor de emisión para el camión lleno (Copert 4, 2013, p. 15).

Datos consumo de energía proceso de manufactura fibra corta:

Una de las fuentes de consumo energético en este escenario es la energía que se requiere para enfriar el agua de 6°C a 11°C, dicho consumo fue dado por Enka de Colombia y es de 4.5 kw-h/h.

Otra fuente de consumo energético es la energía que se requiere para la producción de fibra corta este consumo también es adquirido de la empresa Enka de Colombia y es de 413.5 kw-h/h.

Esta energía es comprada a EPM por lo cual se busco el factor de emisión para su generación en un informe de sostenibilidad de EPM del año 2014.

Datos de residuos:

Los residuos de la producción de fibra corta son de 5.5 kg/h, estos se reciclan para luego volver de nuevo a entrar al proceso por lo cual estos no se contabilizan, ya que están dentro de los 820 kg/h que se requieren en el proceso.

Resultados escenario 1

Con base en los datos de proceso descritos y a los factores de emisión nombrados anteriormente en la tabla 1 se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 3. Resultados obtenidos Entradas al proceso escenario 1

MATERIA PRIMA Y OTROS MATERIALES		
Entrada	Cantidad	Kg CO₂ e/h
Gránulo PET virgen	820 kg/h	1763
Agua	1000 kg/h	0.27
Avivajes	3.2 kg/h	9.13
	Kg CO₂ e/h	1772

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Resultados obtenidos transporte PET virgen

TRANSPORTE					
Transporte	Origen	Destino	Km	Kg CO₂ e	Kg CO₂ e/h
Transporte Marítimo	Corea del Sur-Busan	Colombia-Buenaventura	15031.2	1197014.39	196
Camión lleno	Buenaventura	Girardota	487	2699.871015	69.18
Camión vacío	Girardota	Buenaventura	487	47.24774276	38.74
				Kg CO₂ e/h	304

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Resultados obtenidos Consumo de energía escenario 1

CONSUMO DE ENERGÍA PROCESO MANUFACTURA FIBRA CORTA		
Consumo	Energía Consumida	Kg CO₂ e/h
Enfriamiento Agua	4.5 kw-h/h	0.09
Proceso producción fibra corta	413.5 kw-h/h	7.4
	Kg CO₂ e/h	7.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Resultados obtenidos Emisiones totales escenario 1

EMISIONES TOTALES		
Emisiones totales	2084	Kg CO ₂ e/h
Unidad Funcional	2.6	Kg CO₂ e

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto se obtiene que por cada kilogramo de fibra corta producido con gránulo de PET virgen se emiten 2.6 kg de CO₂e.

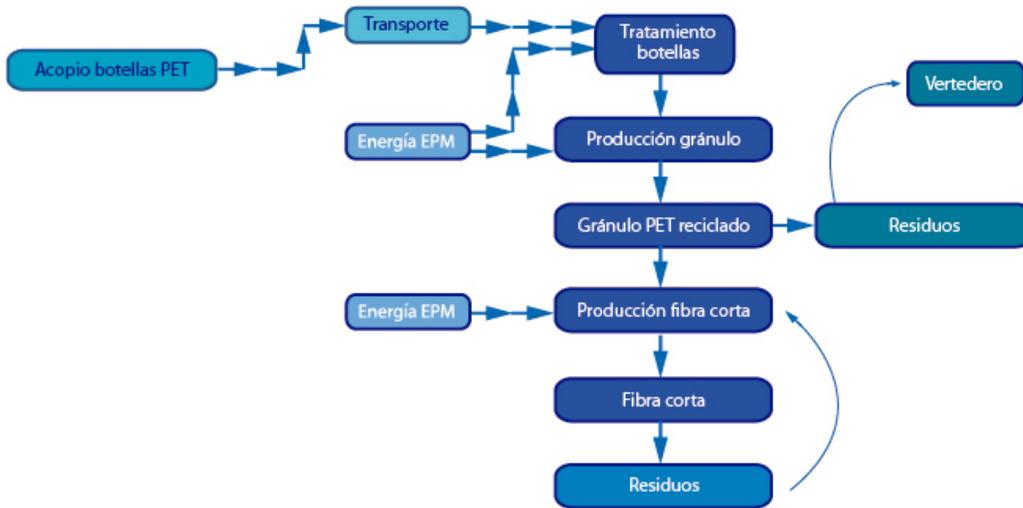
6.2. Escenario 2

Se considera el ciclo de vida de producción de fibra corta a partir de resina de PET reciclada, teniendo en cuentas las entradas y salidas de dicho proceso, de esta manera se podrá evaluar el ahorro con respecto al proceso de fibra corta con PET virgen, mediante el uso de energía de EPM.

Mapa de procesos escenario 2

Se presenta el mapa de procesos simplificado para el escenario 2:

Ilustración 3. Mapa de proceso escenario



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se especifican las fuentes de emisión tenidas en cuenta para el análisis.

Datos del proceso escenario 2

Para el escenario 2 se deben tener en cuenta todas las emisiones asociadas al proceso de reciclaje PET para la producción del gránulo reciclado, todos los datos del proceso de fibra corta son las mismas entradas mencionadas anteriormente en el escenario 1.

Por lo cual se describen todos los datos para el proceso de producción del gránulo PET reciclado:

Datos de entrada a la planta de reciclaje PET:

- **Botellas de PET recicladas**

Para las botellas solo se contabilizan las emisiones del transporte desde las diferentes ciudades de acopio hasta la empresa Enka de Colombia, ya que como las botellas han tenido un uso no se contabilizan las emisiones de la producción para estas, según lo establecido en el Greenhouse Gas Protocol Standard (Greenhouse Gas Protocol, 2015, p. 110).

- **Agua**

Para el agua se tomaron las mismas consideraciones dichas anteriormente para el escenario 1.

- **Agua Helada**

Para esta también se contabiliza la energía utilizada para enfriar el agua.

- **Soda cáustica**

Para esta se busco un factor de emisión para la producción de soda cáustica.

Los datos han sido proporcionados por Enka de Colombia:

Tabla 7. Datos entrada proceso de reciclaje PET

Entrada	Cantidad	Unidad
Botellas PET	1000	kg/h
Agua	9000	kg/h
Agua helada	23000	kg/h
Soda caustica	5.6	kg/h

Fuente: Elaboración propia.

Datos del transporte:

Se ha tenido en cuenta para el transporte de las botellas de PET recicladas que estas provienen de acopios de Bogotá, Medellín y Cali, por lo cual se contabilizaron los kilómetros desde cada una de las ciudades con el factor de emisión para un camión con capacidad de 32 toneladas y luego se sumaron para obtener el resultado de las emisiones totales asociadas al transporte desde los centros de acopio hasta la empresa, se asumió desde Bogotá 411 km, desde Medellín 25.4 km y desde Cali 442 km (Distancias Colombia, 2015).

También se contabiliza el retorno de los camiones vacíos con el 44% del factor de emisión para el camión lleno (Copert 4, 2013, p. 15).

Datos consumo de energía planta de reciclaje PET:

Para la producción del gránulo reciclado el consumo energético para enfriar el agua es de 12.65 kw-h/h, dicho consumo fue dado por la empresa Enka de Colombia.

El consumo energético que se requiere para la producción del gránulo reciclado es de 545 kw-h/h consumo también es adquirido de la empresa Enka de Colombia.

Esta energía es comprada a EPM por lo cual se busco el factor de emisión para su generación en un informe de sostenibilidad de EPM del año 2014.

Datos de los residuos:

En este proceso se obtienen 180 kg/h de residuos los cuales son llevados a vertederos, para esto busco un factor de emisión que incluye el tratamiento, el uso de la tierra, la infraestructura y el transporte para dichos residuos.

Resultados escenario 2

Resultados proceso de producción resina de PET reciclada:

Tabla 8. Resultados obtenidos entradas al proceso

MATERIA PRIMA Y OTROS MATERIALES		
Entrada	Cantidad	Kg CO₂ e/h
Botellas PET recicladas	1000 kg/h	
Agua	9000 kg/h	2.38
Soda Cáustica	5.6 kg/h	6.93
	Kg CO₂ e/h	9.32

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Resultados transporte botellas PET recicladas

TRANSPORTE BOTELLAS PET RECICLADO				
Transporte	Origen	Destino	Kg CO₂ e	Kg CO₂ e/h
Camión Lleno	Bogotá-Medellín-Cali	Girardota	4803.233468	150.10
Camión vacío	Girardota	Bogotá-Medellín-Cali	84.0565857	84.05
			Kg CO₂ e/h	234

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Resultados consumo de energía producción de gránulo reciclado

CONSUMO DE ENERGÍA PLANTA DE RECICLAJE PET		
Consumo	Energía Consumida	Kg CO₂ e/h
Enfriamiento Agua	12.65 kw-h/h	0.22
Proceso reciclaje PET	545 kw-h/h	9.81
	Kg CO₂ eq/h	10.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Resultados tratamiento residuos

RESIDUO		
Residuo	Cantidad	Kg CO₂ e/h
Residuos producción gránulo	180 kg/h	0.98

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Resultados emisiones totales producción de gránulo reciclado

EMISIONES TOTALES		
Emisiones totales	255	Kg CO ₂ e/h

Fuente: Elaboración propia.

De este proceso salen 820 kg/h de gránulo de PET reciclado, generando 255 kg CO₂ e/h, esta será la entrada de materia prima para el proceso de producción de fibra corta.

Resultados proceso de fibra corta escenario 2.

A continuación se muestran los resultados para la producción de fibra corta teniendo en cuenta las emisiones asociadas a la producción de la resina de PET reciclada:

Tabla 13. Resultados entradas al proceso de fibra corta escenario 2

MATERIA PRIMA Y OTROS MATERIALES		
Entrada	Cantidad	Kg CO₂ e/h
Gránulo PET virgen	820 kg/h	255
Agua	1000 kg/h	0.27
Avivajes	3.2 kg/h	9.13
	Kg CO₂ e/h	264

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Resultados energía para el escenario 2

CONSUMO DE ENERGÍA PROCESO DE MANUFACTURA FIBRA CORTA		
Consumo	Energía Consumida	Kg CO₂ e/h
Enfriamiento Agua	4.5 kw-h/h	0.09
Proceso producción fibra corta	413.5 kw-h/h	7.4
	Kg CO₂ e/h	7.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Resultados emisiones totales para el escenario 2

EMISIONES TOTALES		
Emisiones totales	272	Kg CO ₂ e/h
Unidad Funcional	0.3	Kg CO₂ e

Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene que por cada kilogramo de fibra corta producido con gránulo de PET reciclado se emiten 0.3 kg de CO₂e.

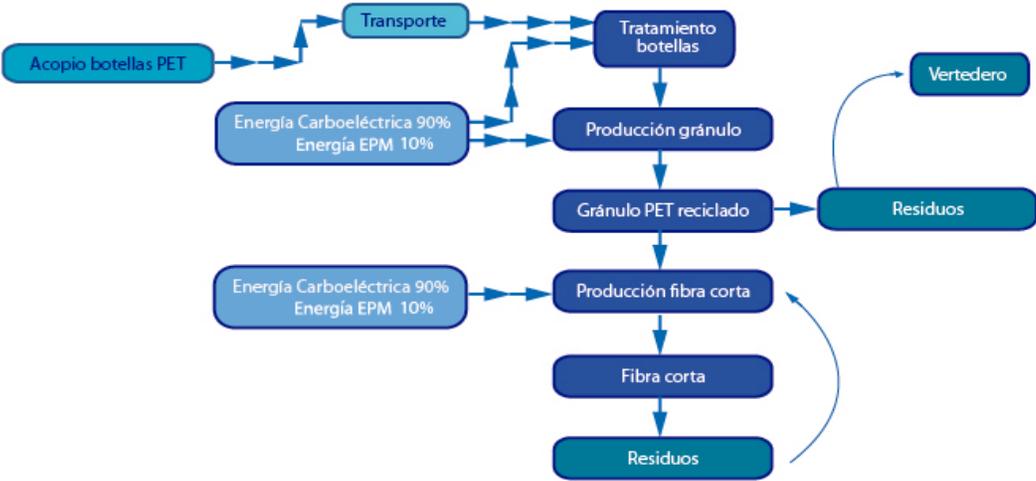
6.3. Escenario 3

Se considera el mismo ciclo de vida anterior, pero en este se evaluarán las entradas y salidas del proceso teniendo en cuenta que la energía proveniente es a partir de la carboeléctrica, de esta manera se comprobará si existe un aumento en las emisiones con respecto al escenario 2.

Mapa de procesos escenario 3

Se presenta el mapa de procesos simplificado para el escenario 3:

Ilustración 4. Mapa de proceso escenario 3



Fuente: Elaboración propia.

Datos del proceso escenario 3

Para el escenario 3 se deben tener en cuenta los mismos factores que para el escenario 2, pero la energía utilizada para este proviene de la carboeléctrica en un 90% y de EPM en un 10%, por lo cual se ha calculado el factor de emisión para la carboeléctrica teniendo en cuenta todas sus entradas y salidas.

A continuación se describen todos los factores para el cálculo del factor de emisión de la carboeléctrica:

Datos de entrada de las materias primas de la carboeléctrica

- **Carbón**

Para el carbón se encontró un factor de emisión para la minería, el carbón es proveniente de la mina Margarita en Amaga, donde la separación después de su explotación se realiza por gravedad por lo cual no se contabilizó las emisiones para dicha separación.

- **Caliza**

Para la caliza se contabilizaron las emisiones de la minería y trituración, el factor encontrado incluye ambas actividades, también incluye el transporte de la mina a la planta de trituración.

- **Chamote**

El chamote es ladrillo triturado proveniente de rechazos, por lo que solo se contabiliza su trituración, como no se encontró un factor de emisión

específico para la trituración de ladrillos, se utilizó el factor de emisión de la trituración de gravilla.

- **Agua**

El agua se contabilizó como se mencionó anteriormente en el escenario 1 y 2.

Los datos son proporcionados por la empresa Enka de Colombia:

Tabla 16. Datos de entrada de materias primas a la carboeléctrica

Entrada	Cantidad	Unidad
Carbón	7378	kg/h
Caliza	409	kg/h
Chamote	237	kg/h
Agua	1336	kg/h

Fuente: Elaboración propia.

Datos de transporte:

- **Carbón**

El carbón viene desde la mina Margarita en Amaga como se mencionó anteriormente, en total son 64 km (Distancias Colombia, 2015), el camión para transportar el carbón tiene una capacidad de 18 toneladas.

- **Caliza**

La caliza viene desde Rio Claro, en total son 150 km (Distancias Colombia, 2015), el camión para transportar la caliza tiene una capacidad de 32 toneladas.

- **Chamote**

El chamote viene de Zipaquirá, en total son 441 km (Distancias Colombia, 2015), el camión para transportar chamote tiene una capacidad de 32 toneladas.

- **Cenizas**

Se contabiliza el transporte para las cenizas que salen de la carboeléctrica, las cuales son llevadas a Argos para la producción de concreto sin algún tratamiento, la salida de cenizas es de 1353.3 kg/h, dato proporcionado por Enka.

También se calculó el transporte del retorno de los camiones, con un 44% del factor de emisión con respecto al valor del camión lleno (Copert 4, 2013, p. 15).

Datos de salida Gases de combustión:

Para los gases de combustión de la salida de la chimenea Enka ha proporcionado los datos, en los cuales se han tenido en cuenta los gases que se reportan como gases de efecto invernadero según lo establecido en el protocolo de Kyoto, por esto no se contabilizaron las emisiones de los gases SO_x y NO_x que salen de la chimenea en cantidades de 97.22 kg/h y 20.21 kg/h respectivamente, estos no se

consideran gases de efecto invernadero, debido a que son gases con vida atmosférica corta (IPCC, 2007).

Para encontrar las emisiones de gases CO₂ a la salida de la chimenea se realizaron una serie de cálculos, los cuales serán explicados más adelante. Enka proporciono la información de que en total salen 128628 m³/h de gases de combustión.

Datos consumo de energía carboeléctrica:

La potencia generada por la carboeléctrica es de 14 MW-h. Se consume para operación de la misma térmica un 10%, entonces se entregan a los procesos productivos 12,6 Mw-h/h.

Resultados escenario 3

Resultados de la carboeléctrica:

Tabla 17. Resultados materias primas carboeléctrica

MATERIAS PRIMAS CARBOELÉCTRICA		
Entrada	Cantidad	Kg CO₂ e/h
Carbón	7378 kg/h	3171
Caliza	409 kg/h	2.36
Chamote	237 kg/h	1
Agua	1336 kg/h	0.35
	Kg CO₂ e/h	3175

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Resultados transporte carboeléctrica

TRANSPORTE					
Transporte	Origen	Destino	Km	Kg CO₂ e	Kg CO₂ e/h
Camión lleno carbón	Amaga	Girardota	64	197	81
Camión lleno caliza	Rio Claro	Girardota	150	820	10
Camión lleno chamote	Zipaquirá	Girardota	441	2411	18
Camión vacío carbón	Girardota	Amaga	64	6.12	45
Camión vacío caliza	Girardota	Rio Claro	150	14.4	6
Camión vacío chamote	Girardota	Zipaquirá	441	42.2	10
Camión lleno cenizas	Girardota	Medellín	25.4	78.1	5.9
				Kg CO₂ e/h	176

Fuente: Elaboración propia.

Para los gases de combustión que salen de la chimenea la empresa reporta los siguientes datos:

Tabla 19. Datos gases de combustión a la salida de la chimenea

Gases de combustión	Cantidad	Unidad
Flujo volumétrico Gases de combustión	128628	m ³ /h
Temperatura	140	°C
Temperatura	413	°K
Presión	0.84	Atm
Presión	85.1	kPa

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Composición gases de combustión

Composición gases	Porcentaje
O ₂	3.23%
CO ₂	13.45%
H ₂ O	9.67%
N ₂	73.65%

Fuente: Elaboración propia.

Se realizaron los siguientes cálculos para encontrar la composición másica de estos gases:

Tabla 21. Fracción másica gases de combustión

Composición	fracción Volumétrica (Y _i)	Peso molecular i (P _{mi})	(Y _i *P _{mi})/100	Fracción másica
	%	kg/kgmol	kg/kgmol	kg/kgmol
O ₂	3.23%	32	1.0336	3.53%
CO ₂	13.45%	44	5.918	20.19%
H ₂ O	9.67%	18	1.7406	5.94%
N ₂	73.65%	28	20.622	70.35%
			29.3142	1

Fuente: Elaboración propia.

Para encontrar el flujo másico de los gases se utilizó la siguiente fórmula:

$$m_{gases} = \frac{v_{gases} * P}{R_p * T} \quad (\text{Cengel, 2012})$$

Donde:

m_{gases} = flujo másico

v_{gases} = Flujo volumétrico gases

P = Presión

R_p = Constante particular de los gases

T = temperatura

Para hallar Rp, se utilizó la siguiente fórmula:

$$R_p = \frac{R \text{ universal}}{P_m \text{ total de los gases}} \quad (\text{Cengel, 2012})$$

Ru	8.31447	kJ/kmol K
Pm gases	29.3142	kg/kmol
Rp	0.2836	kJ/kg K
Flujo másico de los gases	93459.79836	kg/h
Densidad gases	0.7266	kg/m³

Tabla 22. Flujo másico gases de combustión

Composición másica	Fmi	mi'
	%	kg/h
O ₂	3.53%	3295.3
CO₂	20.19%	18867.8
H ₂ O	5.94%	5549.4
N ₂	70.35%	65747.2
Total	100.00%	93459.8

Fuente: Elaboración propia.

Se contabilizan únicamente la salida de los gases de CO₂ debido a que los otros gases no se reportan como gases de efecto invernadero de vida larga en la atmosfera (IPCC, 2007, p. 141).

Tabla 23. Resultado gases de combustión CO₂ carboeléctrica

GASES GEI COMBUSTIÓN CHIMENEA	
CO ₂ kg/h	Kg CO ₂ e/h
18867.8	Kg CO₂ e/h

Fuente: Elaboración propia.

Encontrando estas emisiones de CO₂, podemos hallar las emisiones totales de la carboeléctrica sumando las emisiones de las tablas 17, 18 y 23.

Tabla 24. Resultados factor de emisión carboeléctrica

FACTOR DE EMISIÓN		
Emisiones totales	22219	Kg CO ₂ e/h
Energía	12.6	MW-h/h
Factor de emisión	1.76	KgCO₂e/KW-h

Fuente: Elaboración propia.

El factor de emisión reportado para carboeléctricas está entre 0.64 y 1.64 (National Renewable Energy Laboratory, 2013, p. 1), se debe tener en cuenta que los valores reportados son para grandes carboeléctricas donde la eficiencia puede ser mayor.

Resultados proceso de producción resina de PET reciclada con energía de la carboeléctrica 90%- EPM 10%:

Se asumen todos los mismos valores para el escenario 2 en el proceso de producción de la resina de PET reciclada, solo cambian los valores de los consumos de energía teniendo en cuenta el factor de emisión hallado para la carboeléctrica, para el escenario 3 se contempla el 90% de energía de la carboeléctrica y el 10% de EPM. El factor de emisión teniendo en cuenta esto es de 1.585 KgCO₂e/KW-h.

Tabla 25. Resultados energía proceso de producción resina de PET reciclada escenario 3

CONSUMO DE ENERGÍA PLANTA DE RECILAJE PET		
Consumo	Energía Consumida	Kg CO₂ e/h
Enfriamiento Agua	12.65 kw-h/h	20.05
Proceso reciclaje PET	545 kw-h/h	863.86
	Kg CO₂ e/h	883.9

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados para la entrada de materias primas, transporte y residuos son los mismos que se presentan en las tablas 8, 9 y 11 respectivamente. Teniendo en cuenta estos resultados y las emisiones de energía de la tabla 21 se calculan las emisiones totales del proceso de resina de PET reciclada:

Tabla 26. Resultados energía proceso de producción resina de PET reciclada escenario 3

EMISIONES TOTALES		
Emisiones totales	1128	Kg CO₂ e/h

Fuente: Elaboración propia.

De este proceso salen 820 kg/h de gránulo de PET reciclado, generando 1128 kg CO₂ eq/h, esta será la entrada de materia prima para el proceso de producción de fibra corta.

Resultados proceso de fibra corta para el escenario 3:

Tabla 27. Resultados entradas procesos de fibra corta escenario 3

MATERIA PRIMA Y OTROS MATERIALES		
Entrada	Cantidad	Kg CO₂ e/h
Gránulo PET virgen	820 kg/h	1128
Agua	1000 kg/h	0.27
Avivajes	3.2 kg/h	9.13
	Kg CO₂ e/h	1137

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Resultados consumo de energía proceso fibra corta escenario 3

CONSUMO DE ENERGÍA PROCESO DE MANUFACTURA FIBRA CORTA		
Consumo	Energía Consumida	Kg CO₂ e/h
Enfriamiento Agua	4.5 kw-h/h	7.13
Proceso producción fibra corta	413.5 kw-h/h	655.42
	Kg CO₂ e/h	662.6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Resultados emisiones totales escenario 3

EMISIONES TOTALES		
Emisiones totales	1800	Kg CO ₂ e/h
Unidad Funcional	2.2	Kg CO₂ e

Fuente: Elaboración propia.

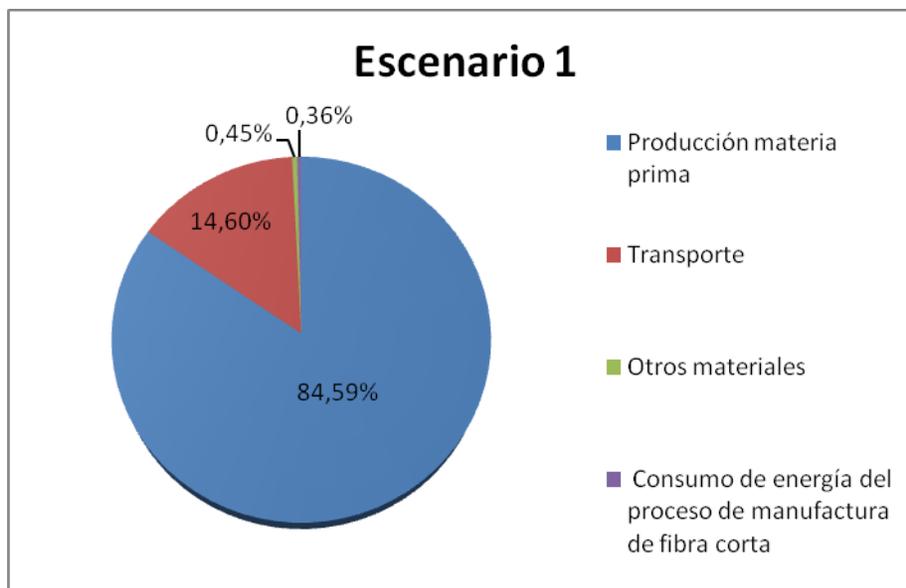
Se obtiene que por cada kilogramo de fibra corta producido con gránulo de PET reciclado con energía de la carboeléctrica se emiten 2.2 kg de CO₂ e.

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se detallan los porcentajes de emisiones para cada uno de los tres escenarios:

7.1. Escenario 1

Ilustración 5. Porcentaje de emisiones escenario 1



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la ilustración 5 el mayor porcentaje de emisiones corresponde a la producción de la resina de PET virgen, representando un 84.5 % del total de las emisiones, esto se debe a que el factor de emisión por cada kilogramo de PET producido es 2.1 kg CO₂e, siendo un factor alto por el uso de materias primas derivadas del petróleo y a todo su proceso de producción.

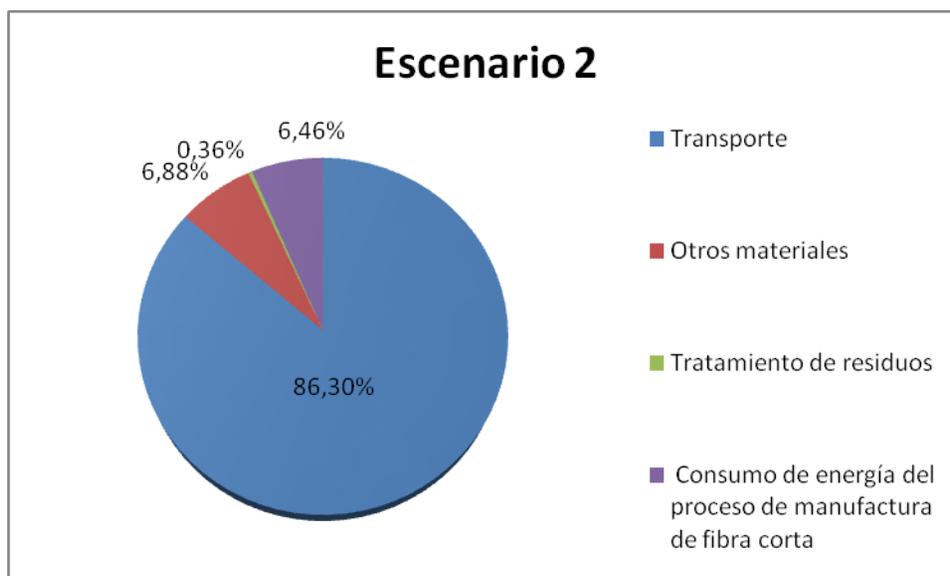
Otro porcentaje importante es el transporte de la resina virgen desde Corea a Girardorta con un 14.6 % de las emisiones debido a las grandes distancias recorridas, aunque el factor de emisión para el transporte marítimo es mucho más bajo que el factor de emisión del transporte terrestre, en este caso se recorren aproximadamente 15000 km marítimos representando más del doble de las emisiones por transporte terrestre.

El consumo energético para este escenario es muy bajo representando un valor del 0.375% de las emisiones totales, esto se debe a que el factor de emisión de EPM es bastante bajo ya que la energía es producida en centrales hidroeléctricas.

El consumo de agua y el uso de aceites minerales para la producción de fibra corta en este escenario es también muy bajo con el 0.45% de las emisiones, en este caso se deben principalmente al uso de aceites minerales los cuales tienen un factor de emisión alto para su producción.

7.2. Escenario 2

Ilustración 6. Porcentaje de emisiones escenario 2



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la ilustración 6 para el escenario 2, la principal fuente de emisiones es el transporte con un 86.3% del total de las emisiones, esto se debe a que las botellas provienen de diferentes ciudades en su gran mayoría vienen de Medellín, Bogotá y Cali.

El consumo energético para este escenario es de 6.46 % al igual que para el escenario 1 es un consumo de energía bajo, pero en este se encuentra incluido el consumo energético que se requiere para la producción del granulo de PET reciclado para el proceso de fibra corta, por lo que en este escenario se da un aumento.

Por otro lado el uso de otros materiales aunque sigue representando un valor pequeño del 6.88% de las emisiones, tiene un aumento por el uso de otros

materiales como la soda cáustica que se utiliza para lavar las botellas de PET por lo que para este escenario se requiere un mayor consumo de agua.

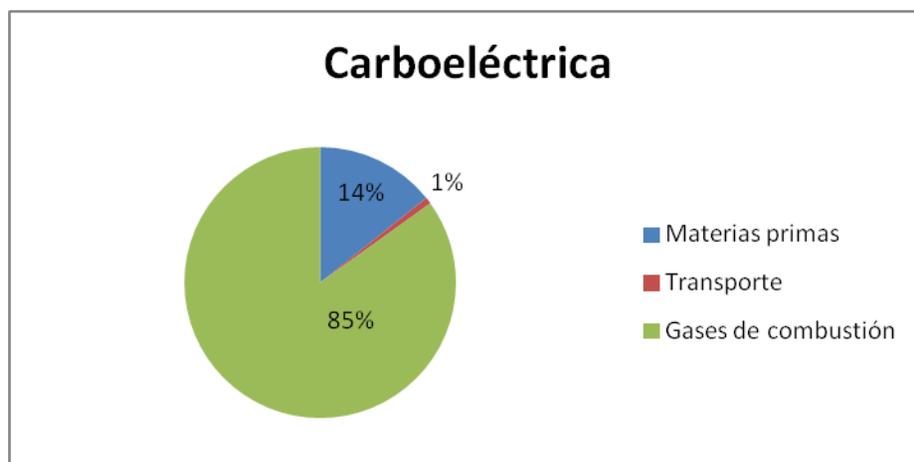
El tratamiento de los residuos representa un valor mínimo de las emisiones, el factor de emisión para estos incluía factores de transporte, pero sigue siendo un factor de emisión bajo.

7.3. Escenario 3

Para este escenario se encontró el factor de emisión de la carboeléctrica de Enka, por lo que se detallan también los porcentajes de emisiones asociados a estas.

Carboeléctrica:

Ilustración 7. Porcentaje de emisiones carboeléctrica 3



Fuente: Elaboración propia.

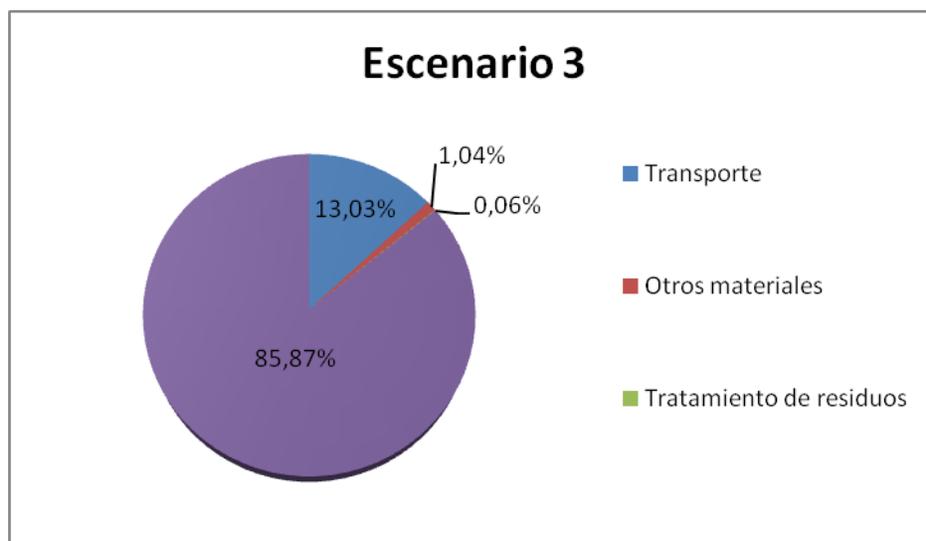
La mayor fuente de emisiones es la quema del carbón lo cual genera grandes cantidades de CO₂, aportando el 85% de las emisiones totales de la carboeléctrica.

Aunque las emisiones producidas por la explotación de las materias primas y su tratamiento son menores que las generadas por la combustión del carbón, representan el 14% de las emisiones debido a su explotación, en su mayoría provienen de la explotación del carbón y de la gran cantidad que se utiliza para la generación de energía.

El tratamiento de las cenizas esta dentro del porcentaje del transporte ya que como se mencionó anteriormente estas son llevadas a Argos para la producción de concreto, el porcentaje del transporte es muy bajo representando apenas el 1% de las emisiones.

Escenario 3:

Ilustración 8. Porcentaje de emisiones escenario 3



Fuente: Elaboración propia.

En este escenario el consumo de energía representa el 85.87% de las emisiones totales donde la energía se genera de la carboeléctrica en un 90% generando un

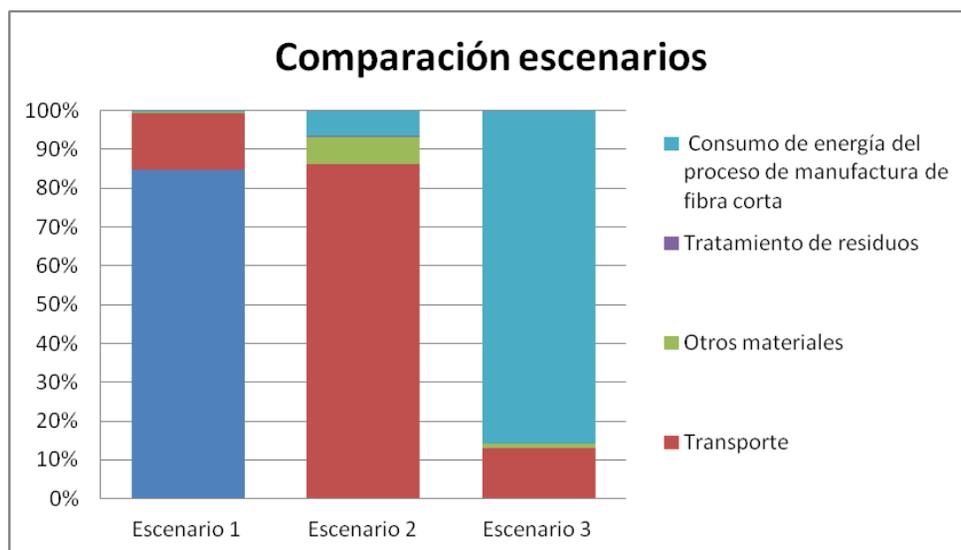
gran aumento con respecto al factor de emisión de la energía de EPM de la que se usa solo el 10%, esto genera un aumento significativo de las emisiones tanto para el proceso de reciclaje del PET como para el proceso de fibra corta, aumentando las emisiones CO₂ casi 7 veces más que las del escenario 2.

El transporte en este escenario representa el 13 %, este transporte al igual que en el escenario 2 es el de las botellas PET desde los diferentes acopios.

El porcentaje del tratamiento de residuos y otros materiales representan muy pocas emisiones para este escenario representando el 0.06% y el 1.04% respectivamente.

7.4. Comparación de los escenarios

Ilustración 9. Porcentaje de emisiones escenario 3

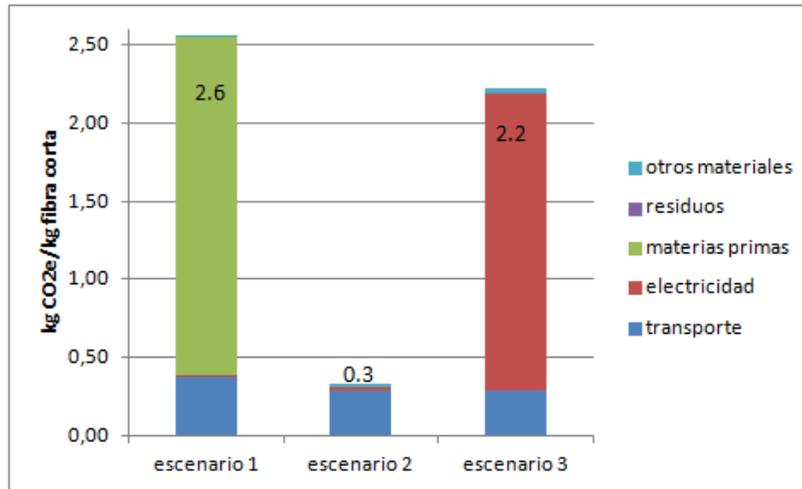


Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 9 se puede observar la diferencia de las fuentes de emisiones para cada uno de los escenarios, para el escenario 1 la mayoría de las emisiones se generan por la producción de la materia prima, en el escenario 2 por el transporte de las botellas PET, mientras que en el escenario 3 por la energía.

También se puede ver el gran aumento de las emisiones en el escenario 3 por el cambio de la generación de energía de EPM a la carboeléctrica.

Ilustración 10. Comparación de emisiones KG CO₂ e

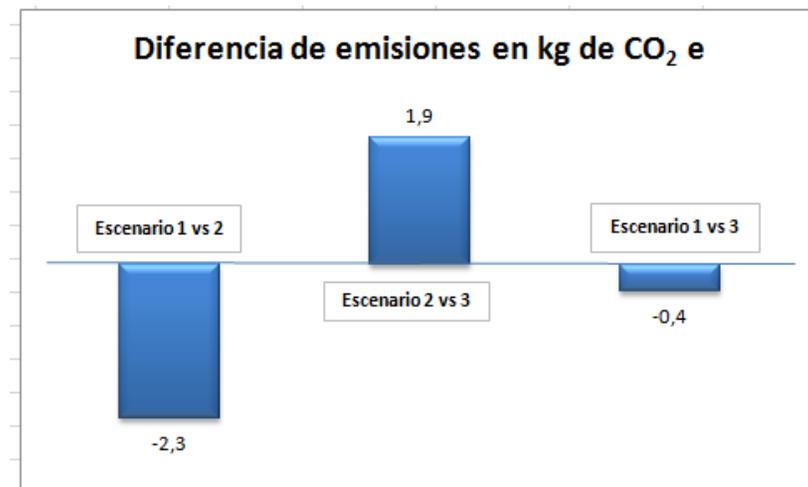


Fuente: Elaboración propia.

Las emisiones de kg de CO₂e para el escenario 1 son de 2.6 kg CO₂e por cada kilogramo de fibra producida, mientras que para el escenario 3 son de 2.2 kg CO₂ equivalente, aunque el escenario 1 tenga mayores emisiones, el valor de emisiones para el escenario 3 aumenta en grandes cantidades por el uso de la carboeléctrica, no es mucha la diferencia entre las emisiones que se generan entre estos dos escenarios.

El uso de la resina PET virgen aumenta aproximadamente 8 veces las emisiones que cuando se utiliza resina de PET reciclada, por lo que en el escenario 2 las emisiones de kg CO₂e son muy bajas con respecto al escenario 1 y al escenario 3.

Ilustración 11. Diferencia de emisiones de emisiones KG CO₂ e



Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 11 se puede ver la diferencia de emisiones de CO₂ e para cada uno de los escenarios. En el caso del escenario 1 vs 2 se logra una disminución de emisiones solo por pasar de material virgen a material reciclado, está disminución se da por todas las emisiones que se asocian a la explotación de materias primas y a la producción del gránulo PET virgen.

En el escenario 2 vs 3 se logra un aumento en las emisiones por el paso de energía de EPM a energía de la carboeléctrica, la explotación del carbón y su quema logra que se de este gran aumento en comparación a la energía de EPM donde utilizan una central hidroeléctrica.

El escenario 1 vs 3 nos muestra la diferencia del paso de material virgen a reciclado cambiando la fuente de energía, donde hay una disminución por el uso del material reciclado. Si se utilizará material virgen teniendo como fuente de energía la carboeléctrica las emisiones podrían aumentar aproximadamente 1 kg CO₂e con respecto a las que se tienen por usar material reciclado.

8. CONCLUSIONES

Mediante el proceso de reciclaje de PET se logran ahorrar 2.3 kg de CO₂e en comparación al proceso con material virgen.

El consumo de energía del proceso de fibra corta usando energía de la carboeléctrica aumenta 1.9 kg de CO₂e las emisiones del proceso en comparación a cuando se utilizaba la energía de EPM.

Hay una compensación entre las emisiones que se generan por el uso de la carboeléctrica y las que se ahorran por el reciclaje de PET, logrando ahorrar 0.4 kg CO₂ e en comparación a cuando se producía con el material virgen.

A pesar de darse una compensación, el uso de la carboeléctrica para la producción de energía genera un aumento aproximadamente del 733% en las emisiones de CO₂ e de Enka con respecto al escenario 2 donde reciclaban PET y utilizaban la energía de EPM.

Las emisiones generadas por la carboeléctrica son de 1.76 kg CO₂ e/KW-h, siendo aproximadamente 100 veces mayor en comparación a las emisiones que se producen en la generación de energía de EPM las cuales son 0.018 kg CO₂ e/KW-h, aumentando con este factor todas las emisiones de consumo de energía en los procesos de Enka de Colombia.

Debido a que se tomaron factores de emisión globales y no propiamente de Colombia, los resultados pueden presentar algunas variaciones en comparación a la realidad.

9. RECOMENDACIONES

- Para próximas investigaciones se recomienda ampliar el alcance del proyecto y hacer una evaluación de análisis de ciclo de vida para todos los procesos productivos de Enka de Colombia.
- Se recomienda en futuras investigaciones hacer mediciones para verificar la precisión de los datos para el inventario de las emisiones GEI.
- Se recomienda comparar los resultados con un software de análisis de ciclo de vida.

10. BIBLIOGRAFÍA

Abarca, C. D. (2015). *Iso 14000 - Análisis del ciclo de vida*. Rio de Janeiro: Cidade Universitária, Ilha do Fundão Bloco F .

Arandes, J. M. (2004). Reciclado de residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(1), 28-44.

Branco, D. A., Mourá, M. C., Szklo, A., & Schaeffer, R. (2013). Emissions reduction potential from CO₂ capture: A life-cycle assessment of a Brazilian coal-fired power plant. *Elsevier*, 61, 1221-1235.

Calderón, J., & Bermeo, J. F. (2012). *Metodología de la huella de carbono en las operaciones*. Proyecto de grado para optar al (Magíster). Universidad Autónoma de Occidente, departamento de Operaciones y Sistemas, Cali, Colombia.

Cengel, Y. A. (2012). *Termodinámica*, 6a. ed. s.l.: Mc Graw Hill.

Chile. Ministerio de Ambiente. (2015). *Informe del estado del medio ambiente*. Recuperado el 13 de marzo de 2015, de <http://www.mma.gob.cl>: <http://www.mma.gob.cl/1304/w3-article-54738.html>

Colombia. Ministerio de Ambiente y Vivienda. (2005). *Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire*. Bogotá: El Ministerio.

- Copert 4. (2013). *Estimating emissions from road transport*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de <http://emisias.com/products/copert-4>
- DEFRA. (2014). *Department for Environment, Food and Rural Affairs: Guidelines DECC's GHG Conversion factors for company reporting*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-environment-food-rural-affairs>)
- Distancias Colombia. (2015). *Las distancias*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de <http://co.lasdistancias.com/>
- ECOINVENT. (2015). *Ecoinvent centre*. Recuperado el 2 de noviembre de 2015, de <http://www.ecoinvent.org/about/organisation/organisation.html>
- Eko, Enka de Colombia. (2012). *Reciclaje PET en Enka de Colombia*. Medellín: Enka.
- Enka de Colombia. (2012). *El PET y su reciclaje*. Medellín: Enka.
- Enka de Colombia. (2014). *Informe anual Enka de Colombia*. Medellín: Enka.
- EPA. (2010). *Environmental protection agency Average annual emissions all criteria pollutants in MS excel*. United States. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de <http://www3.epa.gov/ttnchie1/trends/>
- EPM. (2014). *mitigación del cambio climático, informe 2014*. Medellín: EPM.
- Espíndola, C. (2011). Huella del Carbono. Parte 2: La Visión de las. *Información Tecnológica*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de www.plastico.com

- Espíndola, C. (2012). Huella de carbono, conceptos, métodos de estimación. *Información Tecnológica*, 23(1), 163-176.
- Fernández, D. (2015). *Centrales de generación de energía eléctrica*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- Global Climate Change. (2015). *Global Climate Change*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de <http://climate.nasa.gov/400ppmquotes/>
- Green Cross Argentina. (2010). *Impacto de la Central Termoeléctrica de Río Turbio*. Provincia de Santa Cruz: Green Cross.
- Greenhouse Gas Protocol. (2015). *Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de <http://www.ghgprotocol.org/>
- Gutiérrez, J. (2015). *Reinventando insumos a través de la innovación*. Recuperado el 24 de Mayo de 2015, de <http://www.eafit.edu.co/cice/emprendedores-eafit/Documents/Enka.pdf>
- Hachi, G.; & Rodríguez, J. D. (2010). *Estudio de factibilidad para reciclar envases plásticos de polietileno tereftalato PET, en la ciudad de Guayaquil*. Tesis (Ingeniero Industrial). Universidad Salesiana, Ingeniería Industrial, Guayaquil, Ecuador.
- Instituto Tecnológico Superior. (2010). *Proyecto reciclado de desechos PET*. San Andres Tuxtla: Instituto Tecnológico Superior.

IPCC 4th Assessment Report. (2007). *Changes in Atmospheric Constituents*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>

IPCC. (2001). *Cambio climático y biodiversidad*. Panel intergubernamental sobre el cambio climático. Recuperado el 30 de noviembre de 2015, de <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf>

IPCC. (2005). *Grupo intergubernamental de experto sobre el cambio climático (Cuarto informe de evaluación)*. Recuperado el 2 de diciembre de 2015, de http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml

IPCC. (2007). Cambio climático, informe de síntesis. *Panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC)*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf

IPCC. (2013). Cambio climático 2013. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_brochurees.pdf

IPCC. (2015). *Panel intergubernamental sobre el cambio climático*. Recuperado el 29 de mayo de 2015, de http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/2_Energy_ES.pdf

Kline, A. (2008). La acidificación de los océanos provoca el blanqueo y la pérdida de la productividad en la formación de los arrecifes de coral. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos*, 105(45), 17443-17446.

Meza, L. (2009). *Los arrecifes naturales y artificiales como una alternativa al cambio climático*. Mexico, Escuela Nacional de Ingeniería y Arquitectura, Sección de Estudios de Postgrado e Investigación, Esia – Ticoman, México.

National Renewable Energy Laboratory. (2013). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57187.pdf>

Ortega, N. (2011). *Reciclaje PET de tendencia a negocio. Tecnología del plástico*, 4a. ed. 4. Vol. 26. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de www.plastico.com

PlasticsEurope. (2011). *Ecoprofiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers*. Bruselas: PlasticEurope.

Sea-Distances. (15 de 11 de 2015). *Sea distance-org*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de <http://www.sea-distances.org/>

Secretaría Distrital de Ambiente. (2013). *Guía para la elaboración de un informe de huella de carbono*. Recuperado el 15 de noviembre de 2015, de http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=015755de-1e95-49fb-8c7c-667c4fb398fa&groupId=10157

ANEXOS

Anexo 1. Tabla GEIS considerados en el protocolo de Kyoto

Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency (W m ⁻² ppb ⁻¹)	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR† (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO ₂	See below*	1.4x10 ⁻⁵	1	1	1	1
Methane†	CH ₄	12*	3.7x10 ⁻⁴	21	72	25	7.6
Nitrous oxide	N ₂ O	114	3.03x10 ⁻³	310	289	298	153
<i>Substances controlled by the Montreal Protocol</i>							
CFC-11	CCl ₃ F	45	0.25	3,800	6,730	4,750	1,620
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	0.32	8,100	11,000	10,900	5,200
CFC-13	CClF ₃	640	0.25		10,800	14,400	16,400
CFC-113	CCl ₂ FCClF ₂	85	0.3	4,800	6,540	6,130	2,700
CFC-114	CClF ₂ CClF ₂	300	0.31		8,040	10,000	8,730
CFC-115	CClF ₂ CF ₃	1,700	0.18		5,310	7,370	9,990
Halon-1301	CBrF ₃	65	0.32	5,400	8,480	7,140	2,760
Halon-1211	CBrClF ₂	16	0.3		4,750	1,890	575
Halon-2402	CBrF ₂ CBrF ₂	20	0.33		3,680	1,640	503
Carbon tetrachloride	CCl ₄	26	0.13	1,400	2,700	1,400	435
Methyl bromide	CH ₃ Br	0.7	0.01		17	5	1
Methyl chloroform	CH ₂ CCl ₃	5	0.06		506	146	45
HCFC-22	CHClF ₂	12	0.2	1,500	5,160	1,810	549
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃	1.3	0.14	90	273	77	24
HCFC-124	CHClFCF ₃	5.8	0.22	470	2,070	609	185
HCFC-141b	CH ₃ CCl ₂ F	9.3	0.14		2,250	725	220
HCFC-142b	CH ₃ CClF ₂	17.9	0.2	1,800	5,490	2,310	705
HCFC-225ca	CHCl ₂ CF ₂ CF ₃	1.9	0.2		429	122	37
HCFC-225cb	CHClFCF ₂ CClF ₂	5.8	0.32		2,030	595	181
<i>Hydrofluorocarbons</i>							
HFC-23	CHF ₃	270	0.19	11,700	12,000	14,800	12,200
HFC-32	CH ₂ F ₂	4.9	0.11	650	2,330	675	205
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	29	0.23	2,800	6,350	3,500	1,100
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	14	0.16	1,300	3,830	1,430	435
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	52	0.13	3,800	5,890	4,470	1,590
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	1.4	0.09	140	437	124	38
HFC-227ea	CF ₃ CHFCF ₃	34.2	0.26	2,900	5,310	3,220	1,040
HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	240	0.28	6,300	8,100	9,810	7,660
HFC-245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	7.6	0.28		3,380	1030	314
HFC-365mfc	CH ₃ CF ₂ CH ₂ CF ₃	8.6	0.21		2,520	794	241
HFC-43-10mee	CF ₃ CHFCFCF ₂ CF ₃	15.9	0.4	1,300	4,140	1,640	500
<i>Perfluorinated compounds</i>							
Sulphur hexafluoride	SF ₆	3,200	0.52	23,900	16,300	22,800	32,600
Nitrogen trifluoride	NF ₃	740	0.21		12,300	17,200	20,700