

**EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL PARA LA  
PRODUCCIÓN DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD “PEBD”**

**OMAR ALBERTO ÁVILA ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
POSGRADO EN INGENIERIA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA, COLOMBIA**

**2015**

**EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL PARA LA  
PRODUCCIÓN DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD “PEBD”**

**OMAR ALBERTO ÁVILA ROJAS**

**Tesis de Maestría para optar el título de Magister en Ingeniería Ambiental**

**Director:**

**Dr. Alexander Meneses Jacome  
Ingeniero Químico, Ph.D (C)**

**Codirector**

**Dr. Juan Diego Sierra Muñetón  
Ingeniero Químico, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
POSGRADO EN INGENIERIA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA, COLOMBIA**

**2015**

Dedicado al Dios Todopoderoso y a la Santísima Virgen María,  
especialmente por las bendiciones inspiradas del Espíritu Santo (sabiduría,  
entendimiento y fortaleza)

A mis padres, fuente de creación e inspiración para culminar  
satisfactoriamente, cada etapa de mi vida profesional

A mis hermanos, por ser una de las razones principales, para continuar con  
mi formación personal y ser su prototipo a seguir

Y finalmente, a todos quienes con sus palabras de fe y esperanza, fueron  
directrices en la realización del mérito alcanzado.

Omar Alberto Ávila Rojas

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia dar agradecimientos a la Ing. July Carolina Vivas Báez, por la oportunidad y voto de confianza, para realizar con éxito este proyecto; doy gratitud al Dr. Juan Diego Sierra Muñeton por su orientación, conocimiento, compromiso y enseñanza brindada en la ejecución del mismo.

En segundo lugar al Ing. Oscar Mauricio Casas e integrantes del grupo Petroquímica, quienes permitieron el acceso a la información válida, oportuna, y veraz.

Al Dr. Alexander Meneses Jácome por la dirección del proyecto.

Expreso gratitud al parche de la oficina, quienes con su motivación y consejos, me brindaron la confianza para dar cumplimiento a esta meta.

Al personal administrativo y docentes de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, por sus aportes ofrecidos en el desarrollo de mi formación profesional.

Por último, sinceros agradecimientos aquellas personas que indirectamente han estado en la lucha, para cumplir todos los objetivos propuestos.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>18</b>
<b>1.MARCO METODOLOGICO.....</b>	<b>20</b>
1.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2.JUSTIFICACIÓN .....	22
1.3.OBJETIVOS.....	23
1.3.1.Objetivo General.....	23
1.3.2.Objetivos Específicos .....	23
<b>2.ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEORICO .....</b>	<b>24</b>
2.1.ESTADO DEL ARTE .....	24
2.2.CONTEXTO PRODUCTIVO DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD - PEBD.....	28
2.3.DESCRIPCIÓN DEL PROCESO. ....	29
2.4.ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA “ACV” .....	33
<b>3.FUNDAMENTOS GENERALES DE LA METODOLOGÍA ACV .....</b>	<b>34</b>
<b>4.APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACV .....</b>	<b>37</b>
4.1.FASE I: DEFINICIÓN DE OBJETIVO Y ALCANCE .....	37
4.1.1.Objetivo del Estudio .....	37
4.1.2.Alcance .....	37
4.1.3.Unidad Funcional .....	38
4.1.4.Reglas de Exclusión.....	38
4.1.5.Calidad de Datos.....	39
4.1.6.Revisión Crítica del Proceso.....	39
4.2.FASE II: ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (ICV).....	39
4.2.1.Diseño del Mapa de Proceso.....	39
4.2.2.Identificación y Caracterización de equipos, pertenecientes al proceso de producción de Etileno y PEBD.....	43
4.2.3.Realización de Eco-balances (balances máxicos y energéticos) .....	43
4.2.3.1.Proceso de transporte de pellets .....	46

4.2.4.Escenarios de Comparación y Árbol de Procesos .....	47
4.2.5.Fuentes de Datos .....	54
4.2.6.Limitaciones del Estudio .....	55
4.2.7.Evaluación de Flujos Ambientales .....	56
4.3.SELECCIÓN DEL MÉTODO Y LAS CATEGORÍAS DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL .....	58
<b>5.ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
5.1.EVALUACIÓN DE IMPACTOS POTENCIALES CASO LÍNEA BASE.....	60
5.1.1.Análisis de Caracterización.....	60
5.1.2.Análisis de Contribución – Categoría Calentamiento Global .....	61
5.1.3.Análisis de Contribución – Categoría Acidificación y Nutricación terrestre. ....	62
5.1.4.Análisis de Contribución – Categoría Energía no renovable .....	63
5.1.5.Análisis de Contribución – Categoría Acidificación Acuática .....	64
5.1.6.Análisis de Contribución – Categoría Inorgánicos Respirados .....	64
5.1.7.Análisis de Contribución – Categoría Orgánicos Respirados .....	65
5.1.8.Análisis de Ponderación, modelo línea base.....	66
5.2.ANÁLISIS COMPARATIVO .....	67
5.3.ANÁLISIS ADICIONAL.....	69
5.3.1.Evaluación de Impacto Potencial, escenario de Obtención de Etileno, modelo base. 69	
5.3.2.Evaluación del Impacto Potencial, escenario de Producción de PEBD, modelo base. 72	
5.3.3.Evaluación de Impacto potencial, escenario de Transformación de Pellets (Extrusión), modelo base. ....	75
5.4.ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	76
5.4.1.Evaluación de Impacto Potencial, escenario de Transporte y Distribución de Pellets, modelo base. ....	76
5.5.CONCEPTO SINTETIZADO .....	78
<b>6.CONCLUSIONES.....</b>	<b>81</b>
<b>7.RECOMENDACIONES .....</b>	<b>83</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Evaluación de Impactos en la producción de PEBD. Autor .....	20
Figura 2. Diagrama General de la Unidad de Polietileno. (Autor) .....	30
Figura 3. Diseño de Reactor Autoclave para la producción de PEBD. (Simon, y otros) ....	32
Figura 4. Sistema de Transferencia de Empaque (Autor). .....	33
Figura 5. Metodología aplicada para el desarrollo del ACV. (Autor) .....	34
Figura 6. Metodología del ACV, según norma NTC ISO 14040. (Modificada por Autor a partir (ISO 14040, 2006).....	35
Figura 7. Diagrama de Proceso para el ACV del PEBD.....	36
Figura 8. Alcance y Límites del Sistema objeto de estudio del ACV. ....	38
Figura 9. Proceso de Obtención de Etileno “Cracking de Etano”. (Autor) .....	41
Figura 10. Proceso de Obtención PEBD. (Autor) .....	42
Figura 11. Árbol Global del Ciclo de Vida para la Producción de PEBD, Modelo Base (Corte de Visualización del 1,0 %) .....	49
Figura 12. Árbol Global del Ciclo de Vida para la Producción de PEBD, Modelo Hipotético (Corte de Visualización del 1,0 %) .....	51
Figura 13. Árbol Global del Ciclo de Vida para la Producción de PEBD, Modelo Contexto Europeo (Corte de Visualización del 0,5 %) .....	53
Figura 14. Caracterización de Impactos Ambientales Global, Modelo local de PEBD. ....	61
Figura 15. Perfil medioambiental del Calentamiento Global, Modelo local de PEBD. ....	62
Figura 16. Perfil medioambiental de la acid/nutri terrestre, Modelo local de PEBD. ....	63
Figura 17. Perfil medioambiental de la energía no renovable, Modelo local de PEBD. ....	64
Figura 18. Perfil medioambiental de acidificación acuática, Modelo local de PEBD. ....	64
Figura 19. Perfil medioambiental de Respirados Inorgánicos, Modelo local de PEBD. ....	65
Figura 20. Perfil medioambiental de Respirados Orgánicos, Modelo local de PEBD. ....	66
Figura 21. Ponderación de Impactos Globales, modelo línea base.....	67
Figura 22. Caracterización de Impactos Ambientales Global, Comparación de Modelos..	68
Figura 23. Ponderación de Impactos Globales, asociados a la producción PEBD, comparación de modelos. ....	69
Figura 24. Árbol del proceso de Producción de Etileno (Corte de Visualización del 2,0 %) .....	70
Figura 25. Impactos Globales asociados a la producción de Etileno, modelo base. ....	72
Figura 26. Árbol del proceso de Producción de PEBD (Corte de Visualización del 0,042 %) .....	73

Figura 27. Impactos Globales asociados a la producción de PEBD.....	75
Figura 28. Impactos Potenciales asociados a la extrusión del PEBD (ponderación, método Impact+2002).....	76
Figura 29. Comparación de IP del Transporte de pellets (ponderación, método Impact+2002).....	78
Figura 30. Perfil Medioambiental para la Producción de 1 tonelada de PEBD, según el tipo de energía eléctrica. (Ponderación, método Impact+2002) .....	80
Figura 31. Sistema Compresión primaria, lavado caustico y reacción, Unidad Etileno. (Autor).....	92
Figura 32. Sistema Compresión Secundaria, secado y enfriamiento, Unidad Etileno. (Autor).....	93
Figura 33. Sistema de Fraccionamiento, Unidad Etileno. (Autor) .....	94
Figura 34. Etapa de Iniciación. (Rodrigo Nuñez B., 2007) .....	95
Figura 35. Etapa de Propagación de Cadenas. (Rodrigo Nuñez B., 2007) .....	96
Figura 36. Terminación de Cadenas. (Rodrigo Nuñez B., 2007) .....	97
Figura 37. Transferencia de Cadenas. (Rodrigo Nuñez B., 2007).....	97
Figura 38. Sistema Carga Etileno y Compresión primaria, Unidad PEBD. (Autor) .....	98
Figura 39. Sistema Compresión Secundaria y Polimerización, Unidad PEBD. (Autor) .....	99
Figura 40. Sistema de Extrusión y Transferencia del PE, Unidad PEBD. (Autor) .....	100

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Composición de la carga de Etileno. -----	29
Tabla 2. Identificación de Corrientes para los procesos de obtención Etileno y PEBD ----	40
Tabla 3. Identificación de Equipos en los procesos de obtención Etileno y PEBD-----	43
Tabla 4. Balance de Masa Global para la Producción de Etileno -----	44
Tabla 5. Balance de Masa Global para la Producción de PEBD -----	44
Tabla 6. Balance de Energía Global para la Producción de Etileno -----	45
Tabla 7. Balance de Energía Global para la Producción de PEBD-----	45
Tabla 8. Estimación de la Energía generada en la termoeléctrica de una refinería. -----	45
Tabla 9. Consumo Agua Enfriamiento para el Sistema Extrusión PEBD - Cliente-----	46
Tabla 10. Consumo Energía Eléctrica para el Sistema Extrusión PEBD - Cliente -----	46
Tabla 11. Consumo de Combustible (ACPM) para transportar 1 tonelada PEBD-----	46
Tabla 12. Contribución Ambiental Global, del Modelo local de Producción de PEBD.-----	50
Tabla 13. Contribución Ambiental Global, del Modelo Hipotético de Producción de PEBD. -----	52
Tabla 14. Contribución Ambiental Global, del Modelo Europeo de Producción de PEBD. 54	
Tabla 15. Descripción de los procesos utilizados en cada modelo referenciado. -----	55
Tabla 16. Emisiones generadas en la Unidad de Etileno -----	56
Tabla 17. Emisiones generadas en la Unidad de PEBD-----	57
Tabla 18. Emisiones generadas en la producción de Energía Eléctrica y Térmica. -----	57
Tabla 19. Emisiones generadas en el transporte de PEBD, por medio Tracto Camión tipo N-----	57
Tabla 20. Emisiones generadas en la Extrusión (Film de PEBD)-----	57
Tabla 21. Resumen de Categorías de Impacto según revisión de Estado Arte. -----	59
Tabla 22. Impacto Ambiental Global, del Modelo local de Producción de PEBD-----	60
Tabla 23. Impactos Potenciales generados en la Producción de 1 tonelada de Etileno.--	71
Tabla 24. Contribución de Impactos por ensamblaje, en la Producción de 1 tonelada Etileno-----	71
Tabla 25. Impactos Potenciales generados en la Producción de 1 tonelada PEBD. -----	74
Tabla 26. Contribución de Impactos por ensamblaje, para la Producción de 1 tonelada PEBD.-----	74
Tabla 27. Contribución Ambiental, por consumo de servicios en la transformación de PEBD.-----	75
Tabla 28. Impactos Potenciales durante la transformación de PEBD en pellets.-----	76
Tabla 29. Impactos Potenciales generados por consumo de ACPM-----	77

Tabla 30. Impactos Potenciales generados por la Combustión de ACPM -----	77
Tabla 31. Contribución global de IP durante el transporte de PEBD.-----	77
Tabla 32. Impactos Potenciales asociados a la producción de PEBD, según el tipo de energía eléctrica. -----	78
Tabla 33. Flujos y Condiciones de Operación de las corrientes de la Unidad de Etileno -	91
Tabla 34. Balance Másico Etapa Compresión Primaria, lavado y Conversión, Unidad Etileno.-----	101
Tabla 35. Balance Másico Etapa Secado, Enfriamiento y Fraccionamiento I, Unidad Etileno.-----	101
Tabla 36. Balance Másico Etapa de Fraccionamiento Continua, Unidad Etileno.-----	101
Tabla 37. Balance Másico Consumo de Gas Combustible (160°F, 120psig), Unidad Etileno.-----	101
Tabla 38. Balance Energético Consumo de Energía Eléctrica, Unidad Etileno. -----	102
Tabla 39. Balance Energético Consumo de Agua Industrial (90°F, 55 psig), Unidad Etileno.-----	103
Tabla 40. Balance Energético Consumo de Agua Cruda (150°F, 120 psig), Unidad Etileno.-----	103
Tabla 41. Balance Energético - Vapor Alta Presión (780°F, 465 psig), Unidad Etileno.--	104
Tabla 42. Balance Energético - Vapor Media Presión (550°F, 200 psig), Unidad Etileno.-----	104
Tabla 43. Balance Energético - Vapor Baja Presión (450°F, 55 psig), Unidad Etileno.---	104
Tabla 44. Balance Energético – Circuito Condensado, Unidad Etileno. -----	105
Tabla 45. Balance Másico Etapa Carga y Compresión Primaria, Unidad PEBD. -----	106
Tabla 46. Balance Másico Etapa Compresión Secundaria y Polimerización, Unidad PEBD.-----	106
Tabla 47. Balance Másico Etapa Extrusión y Transferencia de PE, Unidad PEBD.-----	106
Tabla 48. Balance Energético del Agua enfriamiento, Compresión Primaria, Unidad PEBD.-----	106
Tabla 49. Balance Energético del Agua enfriamiento, Compresión Secundaria, Unidad PEBD.-----	107
Tabla 50. Balance Energético del Agua enfriamiento, Extrusión, Unidad PEBD. -----	107
Tabla 51. Balance Energético del Agua enfriamiento, Extrusión, Unidad PEBD. -----	107
Tabla 52. Factores de emisión de CO <sub>2</sub> - Combustibles-----	108
Tabla 53. VCN y factor de L/kg - Combustibles -----	108
Tabla 54. Factores de Emisión CO <sub>2</sub> /L - Combustibles -----	108
Tabla 55. Factores de Emisión CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O - Combustibles -----	108
Tabla 56. Factores de Emisión CH <sub>4</sub> /L y N <sub>2</sub> O/L - Combustibles -----	108
Tabla 57. Emisiones generadas en el transporte de PEBD, por medio Tracto Camión tipo V-----	109
Tabla 58. Cálculos para determinar los kWh/h de un Tratador de Extrusor-----	109
Tabla 59. Inventario Ambiental Global del Ciclo de Vida para la Producción de Etileno.	112

Tabla 60. Inventario Ambiental de Producción de Etileno. -----	113
Tabla 61. Inventario Ambiental de Producción de PEBD. -----	113
Tabla 62. Inventario Ambiental durante el Transporte de PEBD a cuatro localidades. ---	114
Tabla 63. Inventario Ambiental durante la transformación del PEBD (Extrusión Cliente). -----	115
Tabla 64. Consumo energético, steam cracking de nafta, Suecia -----	116
Tabla 65. Consumo energético, Polimerización de etileno, Suecia -----	116
Tabla 66. Contaminantes generados en procesos de cracking y polimerización, Suecia. -----	116
Tabla 67. Contaminantes generados por 1 MJ de energía eléctrica en Suecia. -----	117
Tabla 68. Factores de Emisión, modelos de literatura. -----	117
Tabla 69. Inventario Ambiental, Procesos de producción PEBD, modelo Europeo. -----	118
Tabla 70. Inventario Ambiental, Procesos de producción PEBD, modelo hidroeléctrico.	119
Tabla 71. Contribución Ambiental, Ponderación única, comparación de modelos. -----	120
Tabla 72. Contribución de Impactos, Comparación Procesos de producción PEBD según tipo de energía eléctrica. -----	121
Tabla 73. Inventario Ambiental, Comparación Procesos de producción PEBD, según tipo de energía eléctrica. -----	121

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Glosario.....	88
Anexo B. Descripción de Procesos Industriales para Obtener Etileno .....	91
Anexo C. Descripción del Proceso Industrial para Obtener PEBD .....	95
Anexo D. Inventario de la Unidad de Etileno .....	101
Anexo E. Inventario de la Unidad de PEBD .....	106
Anexo F. Categorías de Impacto Potencial .....	110
Anexo G. Inventario Ciclo de Vida, Caracterización de Impactos Ambientales .....	112
Anexo H. Comparación de Proceso de PEBD en la Literatura. ....	116
Anexo I. Inventario Ciclo de Vida, Comparación de Procesos de PEBD en la Literatura. ....	118
Anexo J. Inventario Ciclo de Vida, Comparación de Procesos de PEBD según el tipo de energía eléctrica en Sur América.....	121

## ABREVIATURAS

**ACP:** Acidificación

**ACV:** Análisis de Ciclo de Vida

**EACV:** Evaluación del Análisis de Ciclo de Vida

**EIAP:** Evaluación de Impacto Ambiental Potencial

**EICV:** Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

**EP:** Eutrofización

**GWP:** Calentamiento global

**IAP:** Impacto Ambiental Potencial

**MP:** Material Particulado

**PA:** Poliamida

**PEAD:** Polietileno de Alta Densidad

**PEBD:** Polietileno de Baja Densidad

**PELBD:** Polietileno lineal de Baja Densidad

**PET:** Polietilentereftalato

**PHA:** Polihidroxialcanoatos

**PHB:** Polihidroxibutirato

**PLA:** Polilactidos

**POCP:** Creación de capa Fotoquímica

**PP:** Polipropileno

**PS:** Poliestireno

**PVC:** Polivinilcloruro

**TBPA:** Terbutilperoxiacetato

**TBPP:** Terbutilperoxipivalato

**TPS:** termoplástico de almidón

## RESUMÉN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD "PEBD". \*

**AUTOR:** Omar Alberto Ávila Rojas\*\*

**PALABRAS CLAVES:** PEBD, ACV, Impacto Ambiental Potencial, Categoría de Impacto Ambiental,

Este estudio aborda la evaluación de los impactos ambientales, asociados a la producción de 1 tonelada de Polietileno de Baja Densidad (**PEBD**) de petróleo. Para el desarrollo del estudio, se ha aplicado la metodología de análisis de ciclo de vida (**ACV**) de acuerdo a las directrices de la norma ISO 14040 y 14044. El ACV se centró en las fronteras del sistema para las etapas de producción: una planta de polietileno de baja densidad que opera en condiciones tecnológicas y económicas medias en Sur América. Siguiendo este enfoque "puerta a puerta", las etapas del ciclo de vida considerada fueron: (i) el proceso de obtención de etileno (etapa de compresión primaria, lavado caustico, secado y enfriamiento, fraccionamiento), (ii) la producción de polietileno (compresión primaria, compresión secundaria, sistema de reacción, sistema de extrusión y transferencia), (iii) el transporte de gránulos (cuatro localidades), (iv) la transformación (película soplada). Se excluyeron los impactos potenciales asociados con la obtención de materiales primas (la extracción de petróleo, el etano, iniciadores y otros aditivos químicos) y bienes de capital (maquinaria, equipos de procesamiento, manejo y transporte, y edificios).

Las categorías de impacto ambiental consideradas fueron: el Calentamiento global, uso de Energía no renovables, Inorgánicos Respirados, Orgánicos Respirados, Acidificación y Nutricación Terrestre, Acidificación acuática, que se evaluaron utilizando el método para la evaluación ambiental Impacto 2002+ v2.05, incorporado dentro del software especializado Simapro 7.1. Los resultados obtenidos se compararon con la información disponible (datos de software y la literatura) para la producción de polietileno de baja densidad en el contexto europeo como contribución auxiliar de este estudio. El estudio se realizó con el objetivo de identificar oportunidades de mejoras ambientales en el ciclo de vida del PEBD.

---

\*Proyecto de grado.

\*\*Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Ambiental. Director: PhD (C) Alexander Meneses Jacome; Codirector: Ph.D. Juan Diego Sierra Muñeton

## ABSTRACT

**TITLE:** POTENCIAL ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT IN PRODUCTION OF LOW DENSITY POLYETHYLENE "LDPE". \*

**AUTHOR:** Omar Alberto Ávila Rojas \*\*

**KEYWORDS:** LDPE, LCA, Potential Environmental Impact, Environmental Impact Category

This study tackles the environmental impacts assessment associated with the production of 1 ton of Low Density Polyethylene (LDPE) from petroleum. In order to develop the study, the methodology of Life Cycle Analysis (LCA) has applied in agreement with ISO 14040 and 14044 guidelines. The LCA was focused on the system borders of the production stage: a LDPE plant operating under average technological and economic conditions in South America. By following this approach "gate to gate", the life cycle stages considered were: (i) the process of obtaining ethylene (primary stage compression, caustic washing, drying and cooling, fractionation), (ii) the polyethylene production (primary compression, high compression and reaction system, extruding system and transfer), (iii) the transportation of pellets (four locations) and (iv) their transformation (blown film). Potential impacts associated with obtaining raw materials (oil extraction, ethane, initiators and other chemical additives) and capital goods (machinery, processing equipment, operation and transportation and buildings) were excluded.

The environmental impact categories considered were: global warming, nonrenewable energy, Respiratory Inorganic, Respiratory Organic, Terrestrial Acidification and Nutrification, Aquatic Acidification, which were evaluated using the method for environmental assessment Impact 2002+ V2.05, incorporated within the specialized software Simapro 7.1. The obtained results were compared with available information (software data and literature) for LDPE production in the European context as ancillary contribution of this study. The study was conducted with the aim of identifying opportunities for environmental improvements in the life cycle of LDPE.

---

\*Graduation Project

\*\*Faculty of Physical-chemical Engineering. Chemical Engineering School. Master Environmental Engineering. Director: Ph.D. (C) Alexander Meneses Jacome; Codirector: Ph.D. Juan Diego Sierra Muñeton

## INTRODUCCIÓN

Desde la década de los ochenta y en especial en los años noventa, se iniciaron los primeros estudios de evaluación de impacto ambiental potencial, para la producción de ácido nítrico y de residuos de incineración. Años después se abordó la producción de polímeros obtenidos de recursos no renovables (petróleo). Estos polímeros se caracterizan por la dificultad existente en la disposición final del mismo (reciclaje) y en la reutilización, que no es tan factible en algunos países (CEMPRE, 2008).

Más recientemente, se han realizado diferentes estudios para disminuir los efectos ambientales negativos relacionados con la obtención de polímeros. Una de las alternativas consideradas es la producción de plásticos mediante el uso de materias renovables o de origen natural (biomasa, fibras naturales) (Guo, 2012) (Ruban, 2012) (Valentina Siracusa, 2014). Por ende, surge la necesidad de evaluar los impactos ambientales generados en la producción de Polietileno de baja densidad (PEBD) a nivel nacional y considerar las ventajas y desventajas dadas por estos polímeros convencionales.

Es así, que con base en los aspectos ambientales negativos (cambio climático, acidificación, vertimientos, residuos sólidos) generados por el inadecuado uso, consumo y transformación de materias primas en productos, que no cumplen con la matriz legal (Göran. Finnveden, 2009), surgió la necesidad de evaluar los impactos ambientales potenciales, generados en la producción de polietileno de baja densidad (PEBD) y considerar las ventajas y desventajas dadas por estos polímeros convencionales.

Una solución en la disminución de los impactos ambientales, ha sido la valoración, evaluación y comunicación, del ciclo de vida (**ACV**) de los productos y servicios, que a su vez permite la toma de decisiones encaminadas al cambio radical en el cuidado del medio ambiente.

Es importante mencionar, que la producción mundial del polietileno de baja densidad para el año 2011, se evaluó por encima de 19,1 millones de toneladas métricas. Los EE.UU., China y Francia son tres principales productores de PEBD y cubren el 31 % del mercado mundial. Europa es el principal exportador de polietileno de baja densidad y en 2011 exportó 11,78 mil millones de dólares (USD). Se espera que la producción de PEBD en todo el mundo, ascienda hasta 22 millones de toneladas en el año 2015 y a 24,4 millones de toneladas en el 2018. (Merchant Research & Consulting Ltda, 2013).

Es de interés conocer que el Análisis de Ciclo de Vida (**ACV**) como una herramienta que permite evaluar los diferentes impactos ambientales generados por el consumo de materias primas y de servicios industriales, durante el ciclo de vida (producción) de un producto o servicio. El Análisis de Ciclo de Vida, involucra la recepción de materias

primas, las etapas de transformación, la distribución y comercialización de productos, el consumo y disposición final del producto, y la generación y disposición final de los residuos (Dr. Arnold Tukker, 2002). A su vez, el Análisis de Ciclo de Vida permite evaluar diversos impactos ambientales. De manera general un ACV incluye cuatro etapas fundamentales: la definición del objetivo y alcance, el análisis de inventario del ciclo de vida, la evaluación de impactos y la interpretación del impacto del ciclo de vida (ISO 14040, 2006) (Ekvall T., 2005).

El presente trabajo de aplicación del ACV para la valoración ambiental de la producción de PEBD, consta de seis capítulos. El primero define el marco metodológico en el cual se describe el planteamiento, la justificación y los objetivos del proyecto. El segundo y tercer capítulo describen el marco teórico y el estado del arte. El cuarto capítulo muestra el desarrollo de la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, que antecede el capítulo de análisis e interpretación de los resultados. Finalmente en el sexto y séptimo capítulo se dan a conocer las conclusiones y recomendaciones derivadas de la aplicación.

Es importante anticipar que en este trabajo, el proceso de obtención de PEBD se realizó con datos típicos de la industria, agregando la evaluación del proceso de obtención de Etileno, el transporte de polietileno a una bodega de distribución y la extrusión del polietileno en película soplada. Finalmente se realizó la comparación con los resultados del modelo obtenido con escenarios de producción estándar de PEBD a nivel internacional. Adicionalmente se utilizaron herramientas e indicadores, que permiten evaluar el grado de impacto ambiental, específicamente el software especializado en ACV Simapro 7.1, la base de datos ECO-Invent y el método de evaluación de impactos ambientales "Impact 2002+V2.05".

## 1. MARCO METODOLOGICO

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante la última década, el mercado de polietileno de baja densidad ha comenzado a estabilizarse, debido a que las industrias han promovido nuevos proyectos con mejora en las tecnologías y equipos de producción de este polímero a escala mundial (IHS, 2012). Por consiguiente la producción mundial de polietileno de baja densidad, presentó un crecimiento estable durante el periodo del 2009 al 2012, impulsado a su vez, por el constante aumento de la demanda del producto (IHS, 2012). Siendo así, que en el año 2012, la producción mundial del PEBD ascendió a 19,8 millones de toneladas, registrando un crecimiento de más de 700.000 toneladas año tras año. Europa, Asia y América del Norte son los mayores consumidores de polietileno de baja densidad en todo el mundo, el volumen de consumo de PEBD es más del 86% de la cifra global.

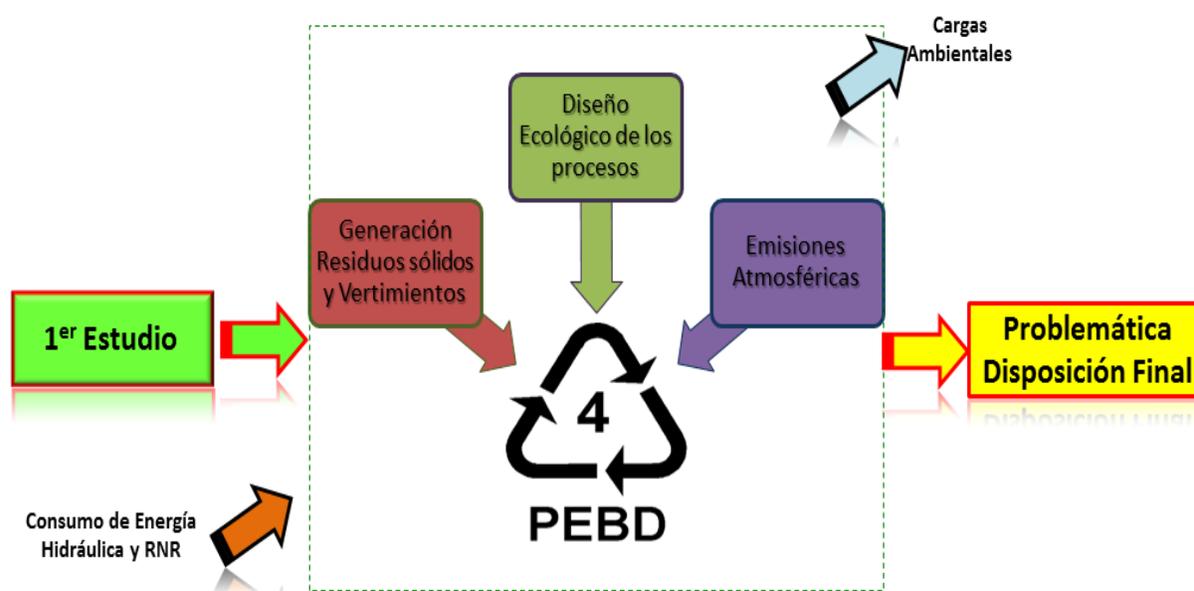


Figura 1. Evaluación de Impactos en la producción de PEBD. Autor

El Polietileno de baja densidad da beneficio a la sociedad por sus diferentes usos y aplicaciones. Sin embargo, actualmente representa un problema ambiental, debido a la creciente demanda del mismo que incide en el consumo de recursos fósiles y por el aumento de los Impactos ambientales negativos generados en la disposición final de los

productos que contienen PEBD (CEMPRE, 2011). Es así, que la Industria de polímeros, está en la búsqueda continua de productos más amigables con el medio ambiente (reducción de emisiones, racionalización del consumo de recursos y energía, diseño ecológico de sus procesos, mayor reciclaje, etc.), como se muestra en la figura anterior.

Este estudio, ha permitido identificar, clasificar y cuantificar las cargas ambientales generadas, con base en el consumo de energía (termoeléctrica) y uso de recursos no renovables (petróleo) durante el proceso de producción de polietileno de baja densidad en el contexto de Sur América.

La información obtenida durante el estudio, permitió crear una base de datos como herramienta para cuantificar los impactos ambientales generados en la producción de polietileno de baja densidad, que fueron valorados, evaluados y comunicados mediante el **ACV** del producto, para la toma de decisiones encaminadas al cambio en el cuidado del medio ambiente, como factor principal.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto busca por medio del ACV identificar los aspectos claves que influyen en el impacto ambiental del polietileno de baja densidad de origen fósil, mediante el consumo energético de energía proveniente de una termoeléctrica y caso comparativo al consumo de energía hidroeléctrica. El desarrollo de la investigación es importante no solo para determinar las cargas ambientales generadas en el proceso, si no para proponer alternativas preventivas según consideraciones ambientales de acuerdo al ciclo de vida del polietileno de baja densidad. Las categorías de impactos de punto medio a evaluar son el calentamiento global, energía no renovable, acidificación acuática, acidificación y nitrificación terrestre, inorgánicos y orgánicos respirados.

Este estudio se realizó mediante la aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida comparativo y el uso del software especializado Simapro 7.1, método Impact 2002+ V2.05. El ciclo de vida se estudió a partir del recibo y carga de materias primas (etileno, iniciadores de reacción, antioxidantes) hasta la obtención del producto durante las etapas de compresión de materias primas, sistema de reacción (polimerización), sistema de extrusión y transferencia del producto. Con los resultados obtenidos del modelo, se realizó posteriormente una comparación de escenarios con información de la producción de polietileno de baja densidad del continente Europeo (datos de software y literatura) y otro modelo con cambio de energía termoeléctrica por hidroeléctrica; lo anterior se realizó como valor agregado al estudio.

Al realizar el estudio comparativo entre los modelos, se espera que el modelo que utiliza energía hidroeléctrica, contribuya con menor carga ambiental para la producción de polietileno de baja densidad, ya que esta energía es menos contaminante con relación a la energía termoeléctrica y energía mix (nuclear, térmica y eólica). De allí, que esta última energía, conllevara a que el modelo europeo sea el que mayor impacto ambiental asocie al proceso. En cuanto a los subprocesos que intervienen en la producción de PEBD, se espera que la producción de etileno, sea el proceso que indirectamente atribuya al aporte mayoritario de los impactos ambientales, atribuido por el mayor consumo energético comparado a los otros subprocesos (polimerización de etileno, transporte y extrusión de polietileno).

## 1.3. OBJETIVOS

### 1.3.1. Objetivo General

- Realizar el estudio de la Evaluación de Impacto Ambiental Potencial para la producción de 1 tonelada de polietileno de baja densidad (**PEBD**) de origen fósil (petróleo), que permita efectuar comparaciones con la producción de **PEBD** en estándar internacional, aplicando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (**ACV**) puerta a puerta.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar y cuantificar los impactos ambientales potenciales, generados en la producción de PEBD desde el uso de materias primas hasta la obtención del producto con datos de la industria.
- Realizar un estudio, que permita plantear diferentes escenarios de comparación entre el PEBD de este estudio vs el PEBD de otros países.
- Hacer un análisis comparativo con resultados de ACV en el sector plástico de un país Europeo vs el modelo obtenido (según lineamientos de literatura y base datos software).

## 2. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEORICO

### 2.1. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo busca hacer una recapitulación de los estudios claves realizados en la industria petroquímica a nivel mundial, en donde se identifica, cuantifica y analizan los impactos ambientales potenciales **(IAP)** generados durante el proceso de producción del polietileno de baja densidad de origen fósil.

Estudios comparativos sobre la estrategia de abordar los impactos ambientales negativos generados por la producción de PEBD a partir de biomasa (caña de azúcar) o de origen fósil (crudo) en Brasil; han demostrado que son originados por el consumo de energía en las etapas de obtención de etanol, la polimerización, extrusión y el transporte del polietileno, con base en la evaluación del análisis de ciclo de vida **(EACV)** del producto. (Liptow, 2009). La comparación entre los polímeros a base de caña de azúcar y de crudo, evidencian que la alternativa de caña de azúcar consume más energía, aunque la mayor parte de energía es renovable. Además, no existe diferencia significativa en los impactos ambiental potenciales **(IAP)** generados por los dos materiales, ya que están direccionados hacia la acidificación, la eutrofización y la creación de ozono fotoquímico. Sin embargo, en relación con el potencial de calentamiento global y la contribución del cambio de uso del suelo es significativo. Según lo anterior, se ha establecido menores diferencias en los principales aportes para estas dos perspectivas de evaluación (Christin Liptow Tillman, 2012) (Boustead, 2008) (Guo, 2012) .

La producción de algunos de los más importantes polímeros comerciales, producidos alternativamente a partir de biomasa (caña de azúcar, virutas, fibras, etc.), ha sido frecuentemente comparada con los convencionales o de origen fósil (Polietileno de alta densidad "PEAD", Polietileno de baja densidad "PEBD", Polipropileno "PP" y Polihidroxibutirato "PHB"). Generalmente en estos estudios se trata de determinar el grado de neutralidad de carbono, de ambos modos de producción, es decir a través de una comparación ambiental que no se limita a comparaciones entre productos, sino que considera el ciclo de vida completo de cada ruta de producción, con el fin de comparar el rendimiento de los diferentes materiales y los efectos de diferenciadores de cada ciclo de vida (Consoli, 1993)

Así por ejemplo, las contribuciones dominantes de la carga ambiental en la producción de PHB, son debidas al consumo de energía en la producción de vapor y alto requerimiento de agua, comparadas al PEBD de origen fósil. La producción de polietileno es igual o más favorable que la producción de PP en todas categorías de impacto consideradas por el

método de evaluación CML 2 y muestra un menor impacto con respecto a la producción de PHB, en las categorías de acidificación y la eutrofización. (Akiyama, 2003).

Por otra parte, entidades Europeas han realizado ACV comparativo de bolsas convencionales fabricadas con distintos polímeros (PEBD, PEAD) y bolsas oxodegradables (PEBD y PEAD oxodegradable, PP no tejido); que ponen evidencia como las bolsas oxodegradables generan menores impactos ambientales, sin existir diferencia significativa sobre el desempeño ambiental entre los 2 tipos de bolsas (Boustead, 2005).

Otro caso considerado en este estudio, fue el ACV para la producción de 1 kg de pellets de PEBD en Europa, el cual requiere para su producción un consumo de energía de 77 MJ. Este consumo de energía, obedece en un 66,12% en la extracción de materias primas y el resto se reparte entre las etapas de transformación y transporte del producto. La emisión más representativa fue el dióxido de carbono equivalente (2,7 kg CO<sub>2</sub>/kg PEBD), aportada en un 51,85% por la producción de crudo (Boustead, 2005).

Un tercer escenario fue el ACV comparativo, para evaluar el impacto ambiental generado en la producción de 100 kg de dos polímeros en pellets y 100 m<sup>2</sup> de películas (Polietileno de baja densidad de origen fósil y un termoplástico de almidón TPS). El estudio estableció que independiente de la forma (pellets o película), el PEBD genera mayores impactos ambientales, por el consumo de: materias primas del área petroquímica, el consumo energético en los procesos de extracción, transporte y refinación del crudo, y las emisiones asociadas para cada proceso en línea. El TPS genera mayor impacto en las categorías de eutrofización y residuos depositados (bulk wastes) (Boustead, 2005).

Los trabajos previamente citados, culminan con la declaración ambiental del PEBD, según el inventario de ciclo de vida acorde al programa Eco-perfil para la industria de Europa. El estudio proporciona el inventario de emisiones, pero obvia los aspectos económicos y sociales, necesarios para una evaluación completa de sostenibilidad. Este determina que para la producción de 1 kg de PEBD, desde la extracción del crudo hasta la obtención del pellet se obtiene el siguiente inventario por categoría de impacto: calentamiento global (2,13 kg CO<sub>2</sub> eq), acidificación (7,74 gSO<sub>2</sub>eq), POCP (1,19 g etileno eq), NP (0,50 g PO<sub>4</sub> eq), material particulado (0,69 PM<sub>10</sub>) - (Boustead, 2008).

Un ACV comparativo basado en la producción de 1000 kg de polímeros de origen fósil (PEBD, PEAD, PP) versus PHB (ácido poli-hidroxibutírico), un polímero completamente degradable en agua en condiciones aerobias y producido a partir de biomasa agrícola (glucosa de caña de azúcar), fue conducido para analizar contribución al calentamiento global y agotamiento de recursos fósiles de cada sistema producto. Este estudio ACV consideró un alcance de la cuna a la puerta de fábrica, incluyendo todas las materias primas, insumos agrícolas, detergentes y el tratamiento de aguas residuales para el PHB.

También incluyó la captura de CO<sub>2</sub> en el crecimiento de la caña de azúcar, pero se excluyeron los impactos ambientales asociados en la construcción de las plantas de proceso y el mantenimiento de los equipos, así como la disposición final de los polímeros (incineración). Este estudio utilizó el método CML 2000 en la evaluación de impacto ambiental y demostró que se requiere mayor consumo energético (generación de vapor y electricidad) y más caro en orden decreciente para los procesos de PHB, PP, PEBD y PEAD. Para el caso del proceso PHB, el uso de vapor se concentra en la esterilización, fermentación y protección esterilizada de los alimentos (K.G. Harding, 2007).

Con el fin de identificar y comparar los impactos potenciales asociados en la producción de 1 kg de PEBD, se realizó un ACV comparativo del PEBD a partir de caña de azúcar (producido en Brasil y utilizado en Europa) y de origen fósil (producido en el Medio Oriente Arabia Saudita y utilizado en Europa). El estudio demostró, que los principales impactos ambientales para el polímero a partir de caña de azúcar están en la producción de etanol, la polimerización, y el transporte marítimo para su consumo. La comparación estableció que este proceso consume más energía, aunque la mayor parte de energía es renovable. Por otra parte, los impactos potenciales asociados a este proceso, se presentan sobre las categorías de acidificación, la eutrofización y la creación de ozono fotoquímico, sin existir una diferencia significativa entre los dos materiales. (Christin Liptow Tillman, 2009)

Otro estudio realizado por el mismo autor, estuvo orientado a la investigación de los IAP generados por los plásticos convencionales a partir de monómeros derivados de biomasa (caña de azúcar de Brasil y viruta de aserradero Sueco) comparado al PEBD de origen fósil, utilizados en Europa. El primer caso de estudio evaluó la producción de 1 kg de PEBD para uso en Europa a partir de etano en base de caña de azúcar de Brasil; el segundo estudio evaluó el mismo producto, a partir de etanol a base de madera de Suecia (Christin Liptow Tillman, 2012).

Para el escenario de PEBD base caña de azúcar, el ACV combinó un enfoque atribucional-consecuencial, mientras que para el escenario de PEBD base (oil), fue solo por atributos. Para el levantamiento de inventario, se utilizaron datos de investigaciones históricas, complementados con la simulación del proceso de conversión de biomasa a etanol en Aspen-Plus. Las categorías de impacto evaluadas fueron: calentamiento global (GWP); acidificación (ACP); producción de oxidantes fotoquímicas (POCP) y eutrofización (EP). Los resultados obtenidos para el PEBD a base de biomasa no muestran ventaja significativa sobre el PEBD fósil en la categoría GWP. En las categorías ACP, POCP y EP el PEBD base madera tiene el peor desempeño ambiental. Sus impactos potenciales son dos veces los de las alternativas base del petróleo y caña de azúcar. El PEBD con peor desempeño ambiental, es el de viruta de aserradero y puede decirse que los PEBDs a base de biomasa no muestran ninguna ventaja clara sobre el PEBD fósil. Por otra parte, en comparación con el fósil y la caña de azúcar, (Christin Liptow Tillman, 2012).

Un estudio similar al anterior, fue el identificar y analizar los impactos ambientales asociados en el ciclo de vida "puerta a puerta" de un 1 m<sup>2</sup> de bolsa coextruída, utilizada para el empaque y conservación de alimentos al vacío, a condiciones de almacenamiento de refrigeración. El tipo de ACV utilizado, fue consecencial y comparativo entre dos bolsas plásticas obtenidas por termosellado con diferente calibre (85 y 65 micras). La evaluación de impactos mostró que las fases más impactantes son la producción de la poliamida (PA) y el PEBD en gránulos, debido al consumo de recursos primarios, como el gas natural y el petróleo. La categoría de los impactos más afectados es el de Recursos, seguido por el cambio climático, la salud humana y de la Calidad del ecosistema (transporte). Estos impactos surgen por un aumento en el consumo energético y de recursos no renovables, al igual, durante el proceso de obtención y extrusión de pellets y película del PEBD, comparado al proceso de PA. (Valentina Siracusa, 2014)

Más recientemente los ACV de polímeros, se han enfocado en aquellos obtenidos mediante nuevas biotecnologías, a partir de materias primas renovables. Es el caso de un estudio ACV de distintos polímeros a base de almidón, entre ellos cinco variedades de polihidroxialcanoatos (PHA), dos de poliláctidos (PLA), tres derivados de bio-polímeros (lignina, resinas epoxi, epóxido, aceite de linaza) y tres que incluyen compuestos basados en fibras naturales (lino, cáñamo y china reed). Los productos finales incluidos en el ciclo de vida fueron pellets, plásticos de embalaje, películas, bolsas, placas de circuitos impresos (electrónica), espesante para laca y dos tipos de paneles para coches. El ciclo de vida de estos productos fue comparado en una etapa posterior con aquellos fabricados con polímeros equivalentes convencionales (PE, PP o PS) a nivel de dos impactos, uso de energía y generación de emisiones de CO<sub>2</sub>. Los resultados ratifican que los biopolímeros contribuyen a disminuir los impactos relacionados al uso de recursos no renovables (materias primas alternas). En el caso del polímero de almidón en pellets, el requerimiento de energía estuvo entre un 25% y 75% por debajo del consumo asociado al PE, lo cual se reflejó de manera proporcional en las emisiones de gases de efecto invernadero (Dr. Martin Patel, 2005)

Es relevante destacar que países como Australia, Suecia, Estados Unidos y el Reino Unido entre otros, tienen experiencia relevante en aplicaciones ACV para elegir la mejor opción respecto al uso y consumo de materias primas (renovables y no renovables). La experiencia mundial que ha comparado el PEBD convencional con otros polímeros (biodegradable), muestran que la producción de bolsas convencionales (PEBD) causa menos daño al medio ambiente en perspectiva a corto plazo, versus las otras bolsas. Las bolsas biodegradables son más sostenibles que las convencionales, y una de las posibles razones son respecto a la definición de las unidades funcionales, las escalas de fronteras del sistema, la lista de materiales utilizados para la producción, etc. (Ruban, 2012).

## 2.2. CONTEXTO PRODUCTIVO DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD - PEBD

Los plásticos son materiales realizados con resinas (polímeros) sintéticos y se producen generalmente a partir de recursos no renovables como el gas y el petróleo. Del total de petróleo usado, un 4% se destina a la petroquímica de plásticos (CEMPRE, 2008).

Específicamente el Polietileno (PE) fue descubierto en 1933 por Reginald Gibson y Eric Fawcett en la Imperial Chemical Industries (ICI). A pesar de que es producido hace más de 70 años, aún sigue siendo un material muy prometedor. Este plástico ampliamente utilizado es un polímero del etileno,  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ , que tiene la fórmula  $(-\text{CH}_2\text{CH}_2-)_n$ . Es producido a altas presiones y temperaturas en la presencia de uno o diversos iniciadores, dependiendo de las propiedades deseadas del producto como uso final (Marekt, 1988). Otras estructuras (que conduce a las ramificaciones largas y cortas) pueden estar presentes, dependiendo del procedimiento utilizado en la síntesis de polimerización. El Polietileno es el polímero de mayor consumo en el mundo. Se trata de un material versátil que ofrece un alto rendimiento en comparación con otros polímeros y materiales alternativos tales como vidrio, metal o papel (Vasile Cornelia, 2005).

Los plásticos se dividen en dos categorías: termoplásticos que son materiales que se pueden fundir con el calor, pueden ser procesados varias veces según el mismo o un diferente proceso de transformación y termofijos o termoestables que son plásticos que una vez moldeados por uno de los procesos usuales de transformación, no pueden modificar su forma y resisten al calor hasta que finalmente llegan a degradarse (Hilkka, y otros, 2004). Dentro de la gran variedad de resinas termoplásticas, apenas seis representan cerca del 90% del consumo: PEBD, PEAD, PP, PS, polivinilcloruro "PVC" y el polietilentereftalato "PET" (Merchant Research & Consulting Ltda, 2013).

Con la creciente demanda del PEBD, el material en sí se ha convertido técnicamente en el más sofisticado y son más específicas sus aplicaciones. Los últimos descubrimientos de la ciencia en la utilización de los polímeros, han dado lugar a innovaciones con catalizadores y otros procesos que mejoran las propiedades del material, y en muchos casos da lugar a una mejor economía en su producción (Sierra, y otros, 2012). Hoy en día, varias tecnologías de proceso de baja presión y de alta presión se han desarrollado para la producción de los diferentes grados de polietileno "PE". En el año 2001, cerca de 20 millones de toneladas de la capacidad del PE se utilizaron en procesos de alta presión y unos 45 millones de toneladas en la tecnología de baja presión. Para el año 2000, un 32 % de la capacidad de polietileno en todo el mundo se utilizó en la producción de Polietileno de baja densidad, un 31 % para la producción de Polietileno de alta densidad y un 37 % de PE para la producción de PELBD. (Hilkka, y otros, 2004)

Europa es el productor mayoritario de Polietileno de baja densidad con un 35% del volumen total de la producción mundial para el año 2012. A su vez, el comercio exterior

del PEBD a nivel mundial alcanzó los US\$ 26,9 mil millones de dólares en el año 2011. Europa es el principal exportador e importador mundial de PEBD. No obstante, las importaciones prevalecen sobre las exportaciones de la región. La producción de Polietileno de baja densidad en todo el mundo, está preparada para un crecimiento sostenido en los próximos años y se espera que vaya más allá de los 22 millones de toneladas en el 2015 (Merchant Research and Consulting Ltd, 2013). Para el 2016, las 4 principales regiones de producción de Polietileno de baja densidad serán Europa Occidental, Oriente Medio, USA y China. Sin embargo, el mayor importador neto continuara siendo China, estas regiones representarían un 41% del volumen total de la producción de Polietileno de baja densidad (IHS, 2012).

Referente a la estrategia petroquímica en territorio nacional, para los periodos 2015 al 2020, se contempla pasar de una producción de 169 kt/año desde el año 2007 a 2,700 kt/año para el año 2020. Igualmente, la industria ha identificado como estrategia empresarial “el crecimiento rentable con foco en aseguramiento de materia prima, optimización operacional y mayor competitividad en el área de petroquímica”. (Sierra, y otros, 2012).

### 2.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

El Polietileno de baja densidad es un polímero producido por polimerización de radicales libre a alta presión. Dos tipos de procesos son comúnmente utilizados: un proceso usando un reactor tubular muy largo, de diámetro pequeño, y un proceso usando un reactor autoclave de tanque agitado. Los dos procesos gozan de igual popularidad en la práctica industrial. (Bernard, 1996; Simon, 1996).

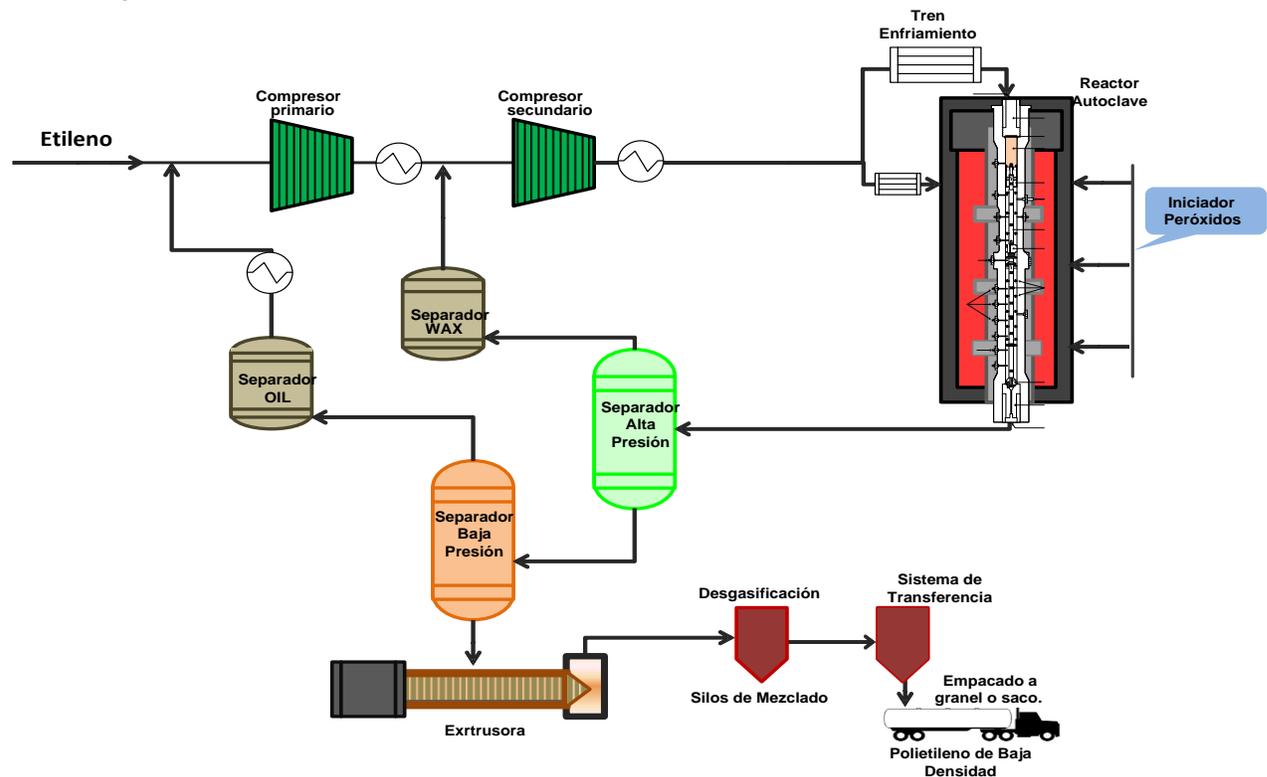
**Tabla 1. Composición de la carga de Etileno.**

Componente	Composición
Metano	200 ppm
Metano + etano	200 ppm
Etileno	99.9% en vol. mín.
Etano	500 ppm
Nitrógeno	-
Dióxido de carbono	10 ppm
Monóxido de carbono	10 ppm
Acetileno	5 ppm
Propileno + otras olefinas pesadas	50 ppm
Oxigenados orgánicos (metanol)	5 ppm (w)
Oxígeno	5 ppm
Hidrógeno	5 ppm
Agua	20 ppm
Azufre total	1 ppm (w)

Una unidad típica de polietileno de baja densidad, operando en el contexto latinoamericano, recibe como carga promedio de 6.0 a 7.0 toneladas/h de etileno como

materia prima, para el proceso de polimerización. La composición aproximada de la carga, indica la composición del etileno que se ingresa a la unidad descrita, tal como muestra en tabla anterior.

Con el fin de llevar a cabo la reacción de polimerización, la unidad emplea compuestos iniciadores que se inyectan justo antes de que el etileno gaseoso entre al reactor. Otros compuestos que se inyectan a la extrusora, son los aditivos encargados de impartir al PE propiedades específicas como la anti adherencia, antioxidante y deslizamiento en algunos tipos de resinas. La carga actual depende de la resina en producción. (GRB, 2010). La unidad de Polietileno genera etileno de reciclo y grasa como subproductos. La **Figura 2** presenta el diagrama general de la Unidad de Polietileno de baja densidad, el cual consta de las siguientes secciones:



**Figura 2. Diagrama General de la Unidad de Polietileno. (Autor)**

- ❑ **Etileno de Reciclo:** Es la corriente que se envía de regreso desde la Unidad Polietileno hacia la Unidad Etileno. Esto se realiza con el fin de descontaminar la corriente. El reciclo se hace cuando se incrementa la concentración de sustancias como CO, CO<sub>2</sub>, metano, etano, propileno e inertes que contaminan la unidad y generan problemas en la operación y/o en el producto. Estas sustancias pueden provenir de la misma carga (metano, etano) o generadas en la reacción (CO<sub>2</sub>).

- ❑ **Grasa:** La grasa es Polietileno en formación, que no alcanza el peso molecular requerido dentro de las especificaciones de producto. Actualmente, es comercializada ya que se han encontrado usos para fabricación de plastilina y vínculos con emulsiones asfálticas.

### **2.3.1. Sección de Recibo de Carga y Compresión Primaria**

Describe el proceso de compresión del etileno hasta 200 psig aproximadas. El objetivo de esta sección es comprimir el etileno fresco de carga proveniente de la Unidad Etileno y el etileno proveniente del Separador de Baja Presión.

### **2.3.2. Sección de Compresión Secundaria e Iniciadores**

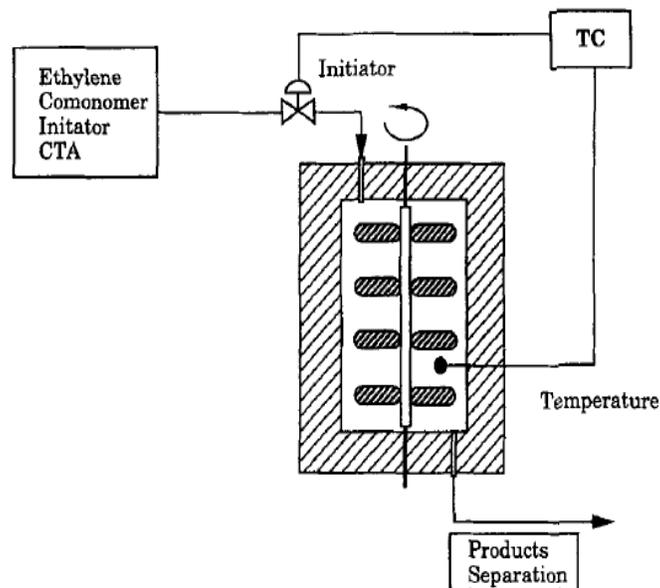
Discute el proceso de compresión del etileno proveniente de la descarga del compresor primario 3000 psig promedio, el etileno reciclo y el sistema de preparación de iniciadores.

### **2.3.3. Sección de Reacción, Separación y Reciclo**

Se refiere a la reacción de polimerización, separación de productos y reciclos del etileno remanente. Algunas características del reactor de autoclave de alta presión, para la producción del Polietileno de baja densidad son (Donald L. Burdick, 2001):

- ❑ El autoclave del Polietileno de baja densidad, tiene paredes muy gruesas debido a que el reactor se presuriza a alrededor de 2,000 atm. El incremento de presión como el control en la dosificación del iniciador, permiten la elevación de temperatura que se utilizará para calcular la conversión del monómero en estado estacionario, con base en los datos de la planta. (Simon, y otros)
- ❑ La dependencia de la temperatura en la velocidad de reacción, adopta la forma de Arrhenius que proporciona concordancia entre los resultados del modelo y los datos experimentales. Así, el sistema de reactor es altamente no lineal. De hecho, se ha encontrado que existen hasta cinco estados estacionarios en este sistema.
- ❑ El comportamiento auto catalítico tanto de la polimerización y de la descomposición, hacen que el reactor sea extremadamente sensible a las perturbaciones de temperatura.
- ❑ La mayoría de los modelos CSTR indican un punto de operación inestable para la producción de polietileno de baja densidad. Sin embargo, un artículo (Marini, 1984) indica, que la mezcla imperfecta puede estabilizar el punto de operación.

- ❑ El reactor de Polietileno de baja densidad, se opera a altas temperaturas y altas presiones con mezcla vigorosa de los reactivos (ver **Figura 3**).
- ❑ El enfriamiento en este sistema viene de la corriente de entrada de agua fría y del monómero que no reacciona y se recircula, en donde, la conversión es una función de esta diferencia de temperatura. Para obtener conversiones más altas, la temperatura de estado estacionario debe ser más alta, lo que indica que la corriente de entrada debe ser más fría para eliminar el exceso de calor.



**Figura 3. Diseño de Reactor Autoclave para la producción de PEBD. (Simon, y otros)**

#### **2.3.4. Sección de Preparación de Aditivos y Extrusión**

Describe el sistema de preparación e inyección de aditivos, flujo del polietileno fundido a través del extrusor y la obtención, secado y clasificación de gránulos. El objetivo de esta sección, es preparar los productos químicos (aditivos), que le imparten propiedades deslizantes, antioxidantes y/o antiadherentes al polietileno cuando lo requiera. También se encarga de dar al producto su forma final de presentación (*pellets*).

#### **2.3.5. Sección de Transferencia de Producto**

Explica la distribución del polietileno “peletizado” en las tolvas de la sección de transferencia dependiendo de su clasificación como *prime* o fuera de especificaciones (FE). Una vez que los gránulos de polietileno se forman, pasan por el secador y el clasificador y son transferidos hacia las tolvas horarias mediante el Sistema de Transferencia 1 (Ver **Figura 4**).

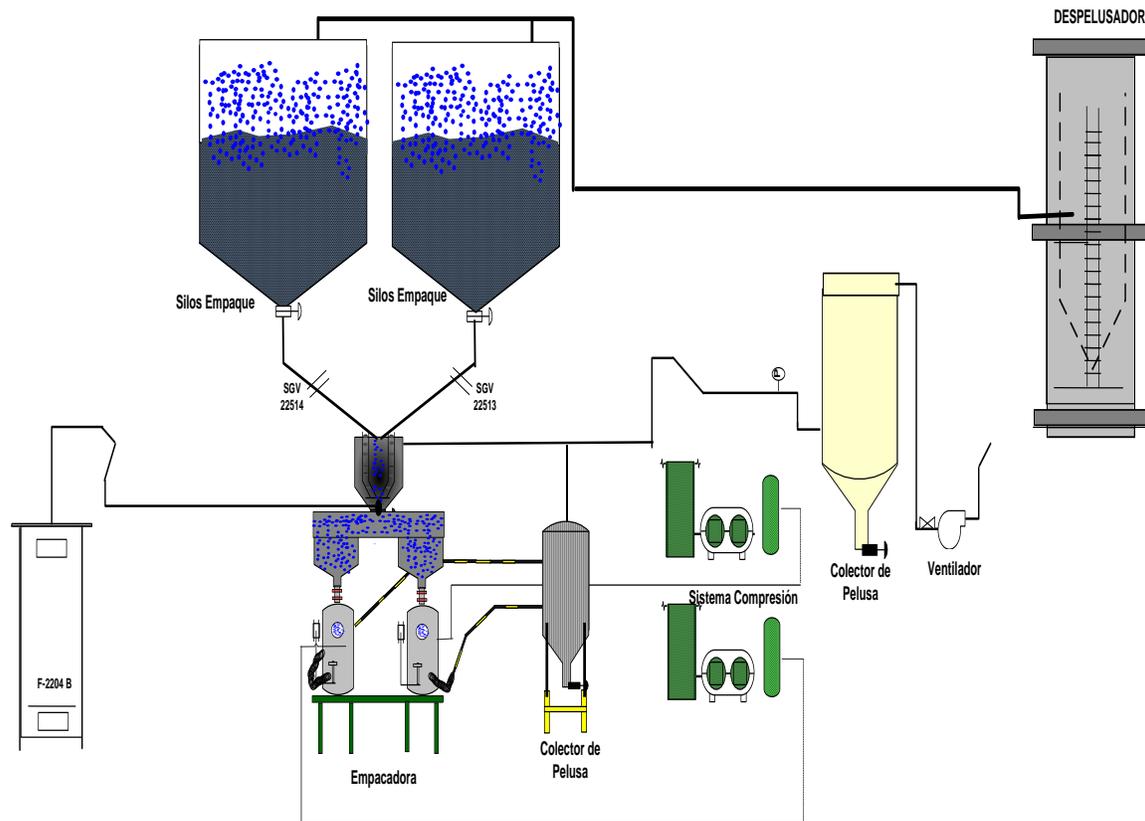


Figura 4. Sistema de Transferencia de Empaque (Autor).

## 2.4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA “ACV”

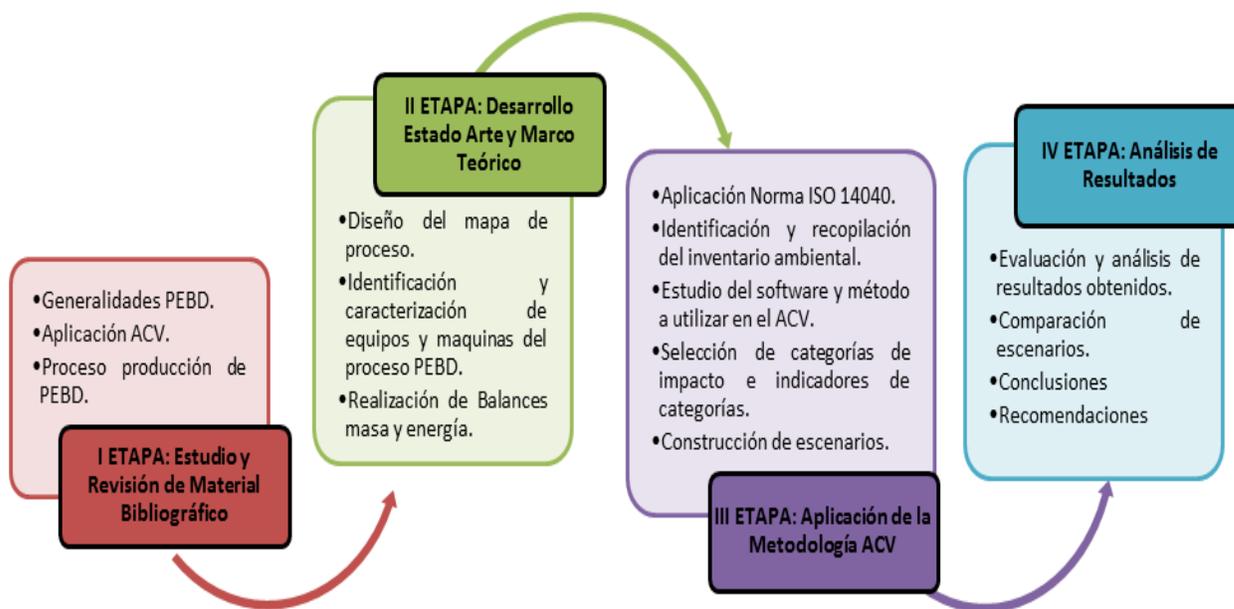
El Análisis de ciclo de vida, es una herramienta integral, pues permite evaluar cuantitativamente y cualitativamente los Impactos Ambientales Potenciales, promovidos por el consumo energético y másico de un producto o servicio (Ekvall T., 2005). La Evaluación del ACV, inicia para algunos estudios, desde la extracción o adquisición de materias primas (cuna), seguida del procesamiento de materias en producto (puerta), transporte de las materias primas o productos (importación o exportación de otros países) y finaliza en la disposición final o eliminación del producto (tumba).

La evaluación de impacto ambiental que presenta este estudio, se desarrolla mediante la aplicación de la metodología Análisis de Ciclo de Vida comparativa (puerta a puerta). Los aspectos del marco teórico relacionados con el ACV, serán tratados en la sección de Metodología.

### 3. FUNDAMENTOS GENERALES DE LA METODOLOGÍA ACV

El Análisis de Ciclo de Vida “ACV” puede ser considerado como la herramienta que marca el estado del arte de la gestión ambiental, en especial en los procesos industriales. Esta herramienta es aplicada desde los controles y acciones al final del proceso, hasta los enfoques preventivos y anticipativos de producción más limpia. A su vez, involucra conceptos y criterios de eco-diseño, mercados y productos verdes, entre otros. (ISO 14040, 2006).

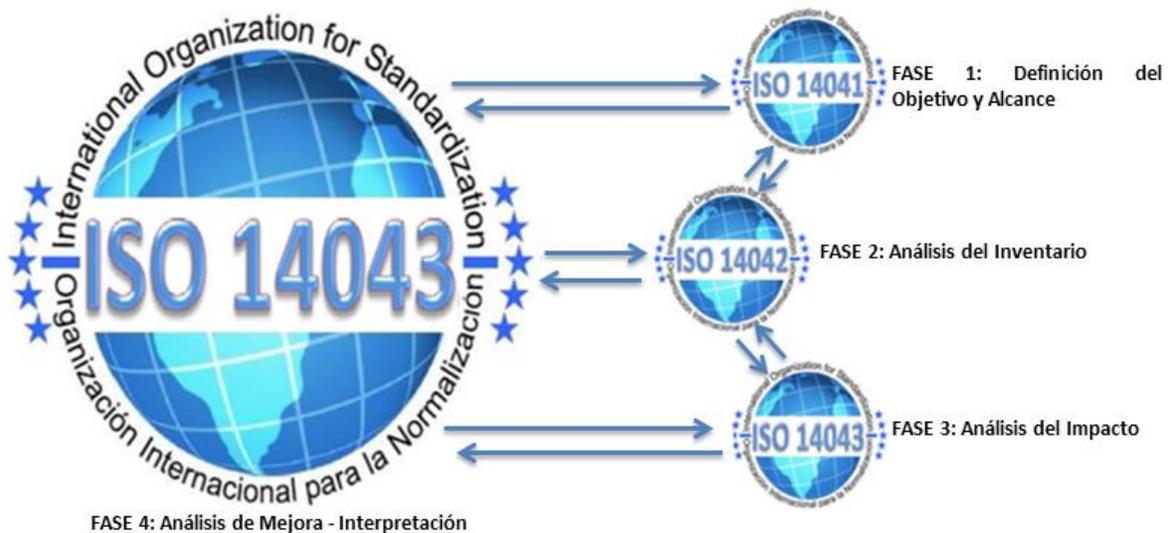
Este capítulo da una breve descripción del procedimiento utilizado para dar cumplimiento a cabalidad, a las normas ISO ambientales, enfocadas a la evaluación de los impactos ambientales negativos según la metodología análisis de ciclo vida. En la **Figura 5** se presentan las etapas implementadas para la evaluación del Impacto Ambiental Potencial generados en la producción de PEBD, mediante la metodología de ACV comparativo.



**Figura 5. Metodología aplicada para el desarrollo del ACV. (Autor)**

El desarrollo de las etapas 1 y 2 mostradas en la **Figura 5** fue presentado en los capítulos previos de este documento. A continuación se procederá a describir con mayor detalle, algunos aspectos adicionales de la etapa 2 y todo lo relacionado con la etapa 3, es decir los aspectos particulares que se consideraran en esta aplicación de la metodología ACV.

Para dar cumplimiento al desarrollo del proyecto y que este a su vez, sea verificable fácilmente según la normatividad ambiental, se tuvo en cuenta la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, según la norma NTC ISO 14040 y NTC ISO 14044 del 2006, como se presenta en la **Figura 6**.



**Figura 6. Metodología del ACV, según norma NTC ISO 14040. (Modificada por Autor a partir (ISO 14040, 2006).**

Para cada etapa se calculan las entradas (materias primas, recursos y energía) y salidas (emisiones a la atmósfera, agua y residuos sólidos). (ISO 14040, 2006). Para el desarrollo de esta investigación, se realizó el análisis de ciclo de vida, teniendo en cuenta el consumo de servicios industriales y de materias primas, en cada una de las etapas presentes en la producción de Polietileno de baja densidad, ver **Figura 7**.

Las incertidumbres atribuidas al Análisis de Ciclo de Vida, dependen en buena medida de la procedencia y variabilidad de la información, utilizada como entradas en el estudio. Esta información es puntual para cada región o nación, dado a que involucran las condiciones y el procedimiento de obtención de las mismas. Un ejemplo particular, es el uso de electricidad, este servicio industrial es generado por diferentes fuentes (hidroeléctricas, termoeléctricas, etc), que según su origen afectan de manera significativa el medio ambiente y el desempeño ambiental general de todo el sistema productivo (Rizo, y otros, 2004). En ese sentido, el ACV es una herramienta que permite estimar los impactos ambientales (IA) más relevantes de un producto, material, proceso o residuo de una forma sistémica, inclusive de un servicio, ya que contempla todas las etapas del ciclo de vida (extracción de la materia prima, producción, transporte, desarrollo del servicio y el post-consumo).

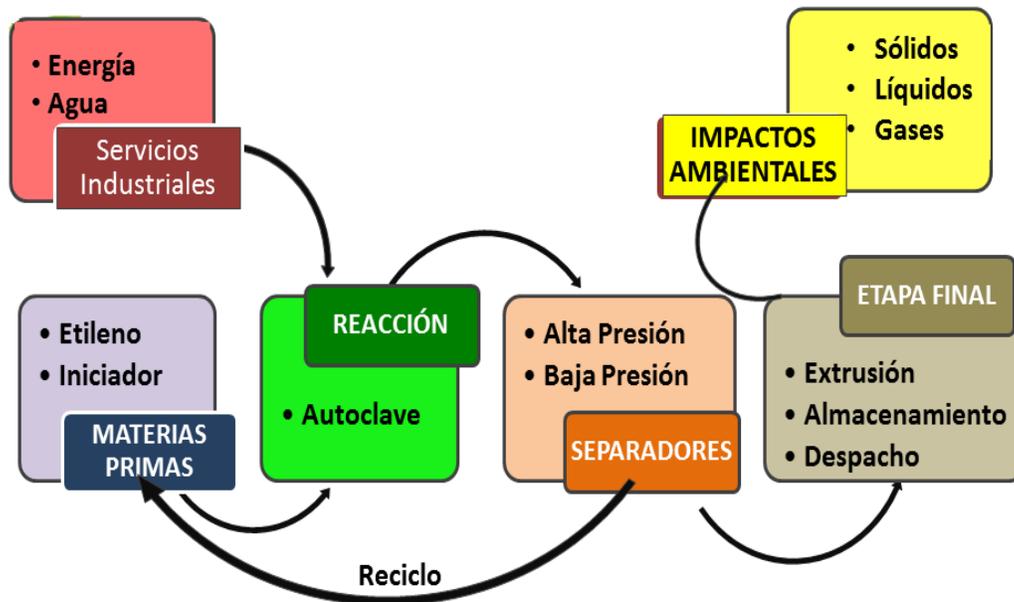


Figura 7. Diagrama de Proceso para el ACV del PEBD. (Autor)

El propósito de la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del Análisis de inventario a fin de comprender mejor su significado ambiental. (ISO 14042, 2006). El EICV aborda no sólo los efectos tóxicos (como la evaluación del riesgo químico), sino también otros impactos asociados a las emisiones de contaminantes atmosféricos (calentamiento global, el agotamiento del ozono estratosférico, acidificación, el ozono fotoquímico) o descargas transmitidas por el agua (eutrofización y la falta de oxígeno), así como los IA de las diferentes formas de uso de la tierra y del agua, del ruido y de las radiaciones, y el uso y la pérdida de los recursos renovables y no renovables. (Consoli, 1993)

La selección de las categorías de impacto y su clasificación, implica la identificación de las categorías de IA que es de interés para el estudio. La Normalización, donde los resultados de la caracterización se relacionan con los valores de referencia; expresa la magnitud relativa de los valores de impacto a una escala que es común a todas las categorías de impacto a fin de facilitar la interpretación de los resultados. Los pasos finales de la EICV incluyen la agrupación o ponderación de las diferentes categorías de IA y consumo de recursos que reflejen la importancia que se les asigna en el estudio. Los Métodos de caracterización tradicionales son ejemplos de modelado punto medio, lo que significa que eligen un indicador en algún lugar entre la emisión y el punto final en el mecanismo del medio ambiente ("punto medio") y el modelo del impacto en este indicador. (ISO 14044, 2006).

## 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACV

En este capítulo se presenta la implementación de la metodología de análisis de ciclo de vida, para el desarrollo de un modelo que permita identificar, clasificar y cuantificar los impactos ambientales potenciales, generados en la producción de polietileno de baja densidad de origen fósil, usando energía eléctrica y térmica de una termoeléctrica.

### 4.1. FASE I: DEFINICIÓN DE OBJETIVO Y ALCANCE

Los principios generales del ACV se establecen en cuatro fases como se ilustra en la **Figura 6**. Específicamente la norma ISO 14041 describe los requisitos especiales y las directrices para la preparación, el desarrollo y la revisión crítica del análisis de Inventarios del Ciclo de Vida (ISO 14041, 1998). Esta primera fase condiciona de forma permanente la continuidad del ACV, desde las necesidades de tiempo y recursos, hasta los resultados finales esperados (Scientific Applications International Corporation (SAIC), 2006).

#### 4.1.1. Objetivo del Estudio

Realizar la Evaluación de Impacto Ambiental Global, para la producción de 1 tonelada de polietileno de baja densidad “**PEBD**” de origen fósil (petróleo), que permita efectuar comparaciones con la producción de **PEBD** en estándar internacional, aplicando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida “**ACV**” comparativo de puerta a puerta.

#### 4.1.2. Alcance

En esta aplicación se propone realizar el ACV para la producción de Polietileno de Baja Densidad. Este incluye la producción del Polietileno, desde el consumo de materias primas (etileno e iniciadores de reacción) en la polimerización y el consumo de los servicios industriales requeridos en el proceso (sistema de agua, electricidad, gas natural y vapor de alta, media y baja presión). Como valor agregado al proyecto se amplió el alcance con los impactos potenciales generados desde la generación de energía térmica y eléctrica proveniente de una refinería, la obtención de Etileno como materia prima para la producción de polietileno de baja densidad, el transporte de pellets hacia las ciudades

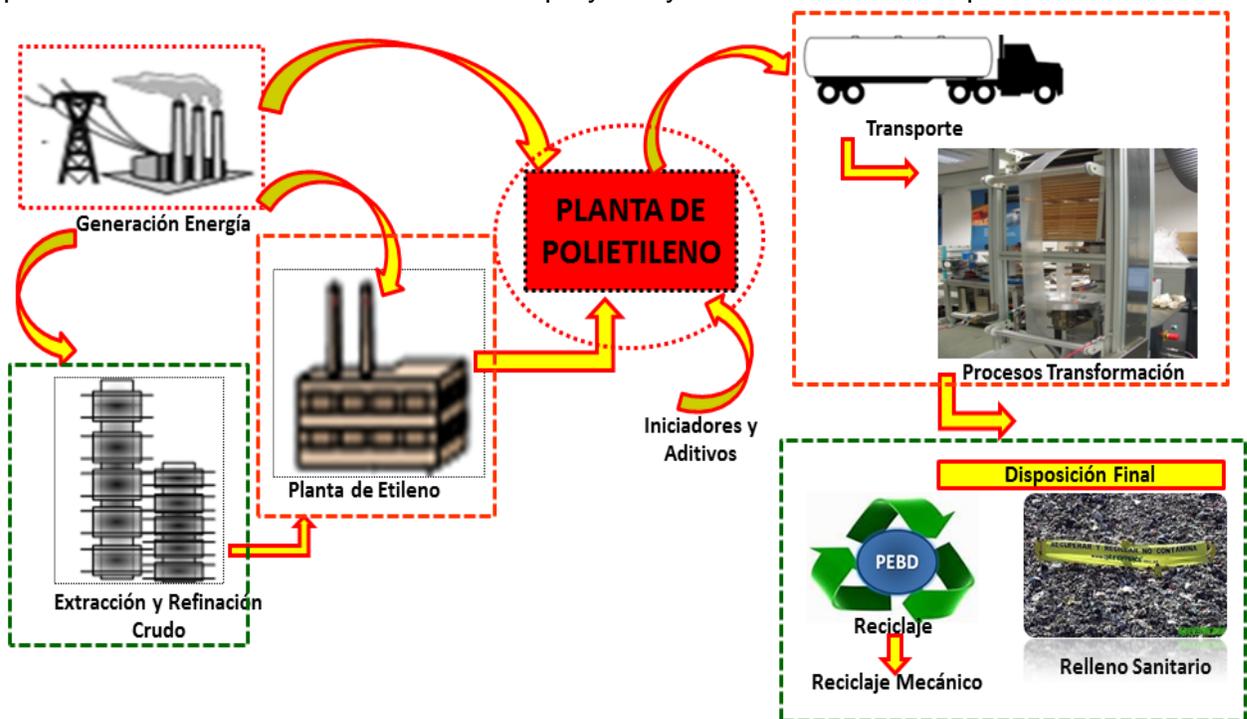
de distribución y comercialización (Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín) y finalmente los impactos asociados en la extrusión del Cliente (película soplada), ver **Figura 8**.

#### 4.1.3. Unidad Funcional

Se contempla como unidad funcional la producción de 1 tonelada de Polietileno de Baja Densidad (PEBD). El consumo del flujo de masa y energía se cuantifico en una base de cálculo de 1 hora (masa en tonelada/h).

#### 4.1.4. Reglas de Exclusión

En esta aplicación no se consideran los procesos de extracción y refinación del crudo, obtención de etano y químicos, obtención de iniciadores en la etapa de polimerización, obtención de aditivos para la extrusión, generación del gas combustible, uso y disposición final del producto (PEBD). Los datos de inventario ambiental se basan en datos genéricos de la Industria, en caso tal, solo con base en lineamientos de la literatura o datos del software. Al igual se desprecia el efecto que tienen los bienes de capital (Maquinaria, equipos de procesamiento, operación y transporte, y edificaciones) durante todas las etapas y unidades del proceso. En la **Figura 8** están demarcados con línea roja, los procesos incluidos dentro del alcance del proyecto y en línea verde las etapas excluidas.



**Figura 8. Alcance y Límites del Sistema objeto de estudio del ACV. (Autor)**

#### **4.1.5. Calidad de Datos**

La información de balances másicos y energéticos, fue obtenida a partir de datos de fuentes directas de la industria petroquímica para el año 2010, con actualización (manuales operativos) de las unidades de proceso para el 2013. Los factores de emisión utilizados para cada unidad de proceso, se estimaron de la Guía Inventario de Emisiones de gases de efecto Invernadero (2013) y del Estudio de Cálculo de la huella de Carbono del año 2009 (2011), como de otras fuentes referenciadas en el contenido del trabajo.

#### **4.1.6. Revisión Crítica del Proceso**

Para asegurar la calidad de la información del ACV, todo el inventario fue revisado por el director, codirector y asesores del proyecto. De igual forma, el inventario fue sometido a una revisión interna, realizado durante un seminario del programa de la Maestría.

### **4.2. FASE II: ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (ICV)**

Esta fase esta direccionada por la norma NTC ISO 14042 (Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida), que tiene por objeto la evaluación de los impactos ambientales potenciales y significativos a partir de los resultados del análisis de inventario (ISO 14042, 2006). Para dar cumplimiento en esta fase, se incluye la recopilación de datos a ser utilizados en el cálculo del consumo de materias primas, servicios industriales y en la realización del perfil ambiental para todas las fases del ACV. La información a presentar se lista a continuación con una breve descripción de la misma, y su respectiva ampliación en el capítulo de anexos.

#### **4.2.1. Diseño del Mapa de Proceso**

En la **Figura 9** y **Figura 10**, se presentan los diagramas de los procesos de obtención de Etileno y Polietileno de baja densidad (PEBD), el cual contiene las corrientes de entrada principal (materias primas, consumo de agua, energía térmica, energía eléctrica, aditivos, iniciadores, entre otros) y las corrientes de salida (productos, coproductos, condensado y emisiones contaminantes) para cada proceso intervenido. En la **Tabla 2** se relacionan las corrientes de entrada y salida para cada proceso de estudio, a las cuales se les asigna un número para efectos de identificación en los diagramas de proceso y en los balances de masa y energía respectivos.

**Tabla 2. Identificación de Corrientes para los procesos de obtención Etileno y PEBD. (Autor)**

Unidad de Polietileno		Unidad de Etileno	
Indicador	Nombre de Corriente	Indicador	Nombre de Corriente
1	Etileno (Unidad Etileno II)	1	Gas de Pirólisis
2	Mix Etileno	2	Reciclo al C-4100 1ra. Etapa
3	Etileno (241°F; 665 psig)	3	Gas succión 1ra. Etapa C-4100
4	Etileno (101°F; 655 psig)	4	Gas descarga 1ra. Etapa C-4100
5	Etileno (206°F; 1384 psig)	5	Gas Succión 2da. Etapa C-4100
6	Etileno (115°F; 1374 psig)	6	Gas descarga 2da. Etapa C-4100
7	Etileno (177°F; 3044 psig)	7	Gas succión 3ra. Etapa C-4100
8	Mix Etileno - Compresión Primaria	8	Gas Descarga 3ra. Etapa C-4100
9	Etileno (120°F; 3034 psig)	9	Gas succión 4ta. Etapa C-4100
10	Etileno (69°F; 3235 psig)	10	Gas descarga 4ta Etapa C-4100
11	Etileno (74°F; 3285 psig)	11	Gas a torre de lavado
12	Etileno (72°F; 3013 psig)	12	Gas salida torre de lavado
13	Etileno (146°F; 12185 psig)	13	Reciclo a 5ta. Etapa C-4100
14	Etileno (107°F; 11800 psig)	14	Gas a reactor
15	Etileno (123°F; 18008 psig)	15	Gas salida del reactor
16	Etileno (129°F; 18470 psig)	16	Gas succión 5ta Etapa C-4100
17	Etileno (135°F; 18470 psig)	17	Gas descarga 5ta Etapa C-4100
18	Etileno (500°F; 18470 psig)	18	Gas a secador
19	Etileno - Separación Alta Presión	19	Gas seco
20	Etileno (323°F; 3070 psig)	20	Feed 3 a T-03
21	Reciclo de Etileno (Unidad Etileno II)	21	Feed 2 a T-03
22	Etileno (121°F; 2960 psig)	22	Feed 1 a T-03
23	Etileno (491°F; 3065 psig)	23	Gas rico en CH <sub>4</sub>
24	Etileno - Separación Baja Presión	24	Gas rico en H <sub>3</sub>
25	Etileno (95°F; 4.4 psig)	25	Gas rico en etano-etileno
26	Etileno (188°F; 68 psig)	26	Fondo T-03
27	Etileno (104°F; 65 psig)	27	Feed a T-04
28	Etileno (197°F; 199 psig)	28	Feed a T-05
29	Etileno (96°F; 195 psig)	29	Etileno vapor producto
30	Resina Polifén	30	Etileno liquido producto
31	Reciclo de Etileno (Compresión Secundaria)	31	Etano reciclo
32	Ciclohexano	32	Feed a T-06
33	Terbutilperoxipivalato	33	GLP
34	Terbutilperoxiacetato	34	Gasolina
35	Iniciador A	35	Humedad
36	Iniciador B	36	UOP II
37	Grasa, Separación Alta presión	37	UOP I
38	Grasa, Separación Baja presión	38	Reciclo Poli I
39	Aceite Mineral		
40	Silice y Eurocamida		
41	Aditivo Preparado		
42	Scraps y Pérdidas		
43	Polietileno		

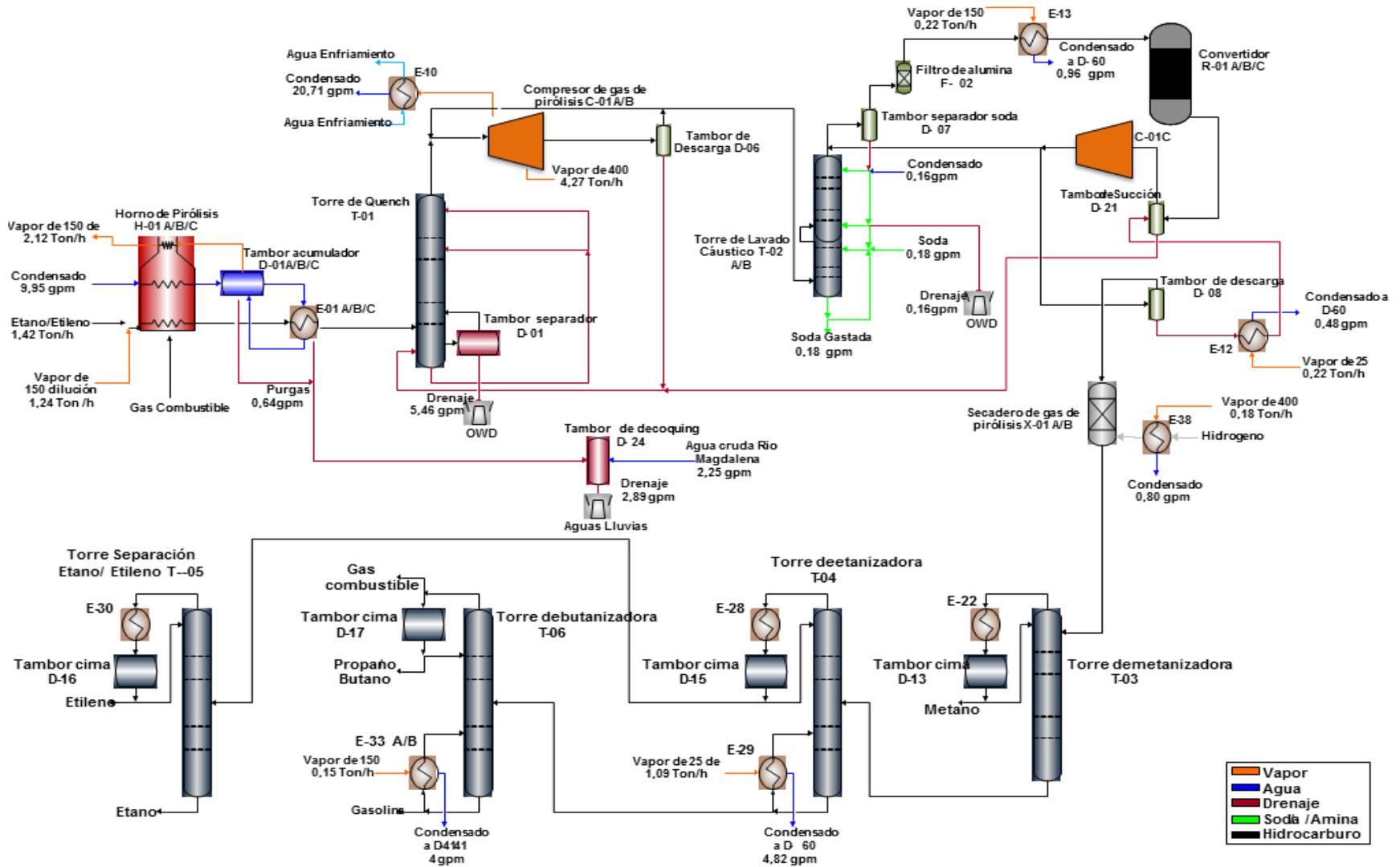


Figura 9. Proceso de Obtención de Etileno “Cracking de Etano”. (Autor)

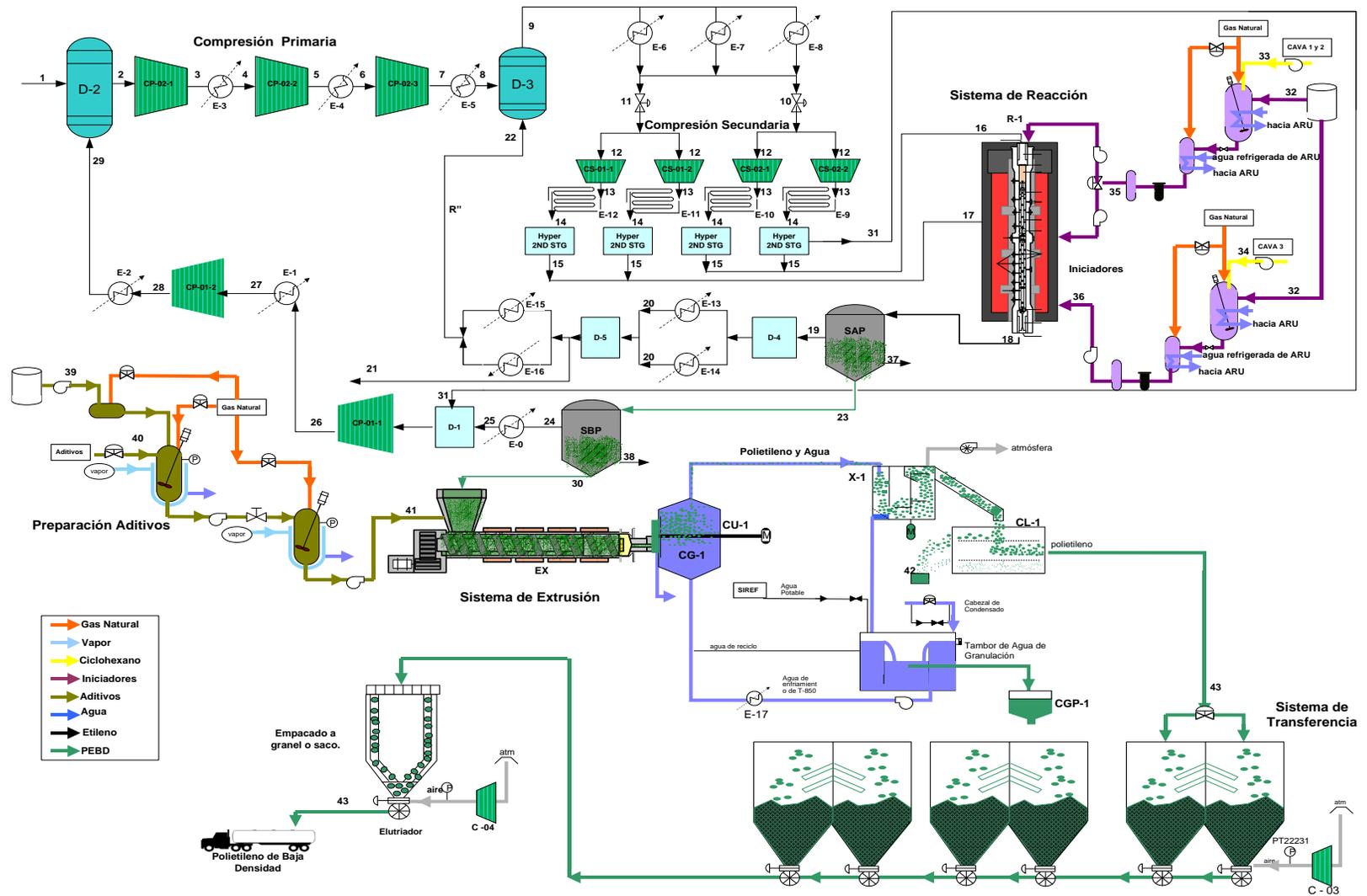


Figura 10. Proceso de Obtención PEBD. (Autor)

En el [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#) y [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#), se explican de manera concisa y clara los procesos de producción de Etileno y Polietileno de Baja Densidad “PEBD”. Cada proceso contiene una descripción de las etapas alusivas al mismo e ilustradas de igual forma a través de un diagrama, con sus respectivas corrientes (entradas y salidas), etapas y equipos.

#### 4.2.2. Identificación y Caracterización de equipos, pertenecientes al proceso de producción de Etileno y PEBD.

En la **Tabla 3** se presenta la nomenclatura empleada para la identificación de los equipos y maquinarias, que operan a condiciones determinadas en los procesos de estudio (Unidad de Etileno y Polietileno). El indicador de cada equipo, se encontrará nexa a los diagramas de proceso y balances respectivos.

**Tabla 3. Identificación de Equipos en los procesos de obtención Etileno y PEBD**

Unidad de Polietileno		Unidad de Etileno	
Indicador	Equipo	Indicador	Equipo
C	Compresor	H	Horno de Pirólisis
CP	Compresor Primario	C	Compresor
CS	Compresor Secundario	E	Intercambiador de Calor
E	Intercambiador de Calor	R	Convertidor
SAP	Separador de Alta Presión	X	Secador
SBP	Separador de Baja Presión	F	Filtro
R	Reactor	D	Tambor separador / cima
EX	Extrusor	K	Tanque
R"	Reciclo	W	Decalentador
CG	Cámara de Granulación	NC	Turbina
CU	Cortador	P	Bomba
X	Secador	T-1	Torre Quench
D	Tanque	T-2	Torre de Lavado Caustico
CL	Clasificador	T-3	Torre Demetanizadora
V	Válvula	T-4	Torre Deetanizadora
Mix	Mezclador	T-5	Torre Separación Etano - Etileno
CGP	Colector de gránulos y pelusa	T-6	Torre Debutanizadora

#### 4.2.3. Realización de Eco-balances (balances másicos y energéticos)

El eco-balance evalúa e identifica los aspectos ambientales (residuos sólidos, líquidos y gaseosos) relacionados al consumo de materias primas, insumos y servicios industriales durante el proceso de transformación de los mismos. Las **Tabla 4** a la **Tabla 7**, dedican a presentar de manera simplificada los balances másicos y energéticos globales de los procesos de producción de Etileno y de Polietileno de Baja Densidad, mientras que los [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#) y [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#) contienen los detalles pormenorizados de los balances de masa y energía para

cada proceso. Los datos fueron obtenidos de los manuales de operación de cada unidad de proceso.

Dado los resultados obtenidos en los balances másicos, se estima mayor consumo de materias primas (3,1632 toneladas) para la producción de 1,0010 tonelada de Etileno, comparado al proceso de obtención de 0,9892 toneladas de polietileno de baja densidad, con un consumo total de materias primas de 1,1373 toneladas.

**Tabla 4. Balance de Masa Global para la Producción de Etileno**

Corriente	Flujo Másico		Unidad
	Entrada	Salida	
1	1,4229	-	Tonelada
36	0,8004	-	Tonelada
37	0,6847	-	Tonelada
38	0,2553	-	Tonelada
35	-	0,0126	Tonelada
23	-	0,9548	Tonelada
24	-	0,9230	Tonelada
29	-	1,0010	Tonelada
30	-	0,2189	Tonelada
33	-	0,0514	Tonelada
34	-	0,0015	Tonelada
	<b>3,1632</b>	<b>3,1632</b>	Toneladas

Fuente: Datos de la Industria

**Tabla 5. Balance de Masa Global para la Producción de PEBD**

Corriente	Flujo Másico		Unidad
	Entrada	Salida	
1	1,1174	-	Tonelada
32	0,0074	-	Tonelada
33	0,0017	-	Tonelada
34	0,0005	-	Tonelada
39	0,0080	-	Tonelada
40	0,0024	-	Tonelada
21	-	0,1170	Tonelada
37	-	0,0038	Tonelada
38	-	0,0038	Tonelada
42	-	0,0236	Tonelada
43	-	0,9892	Tonelada
	<b>1,1373</b>	<b>1,1373</b>	

Fuente: Datos de la Industria

Respecto al consumo global de servicios industriales, hay un mayor consumo de energía eléctrica y térmica en el proceso de Etileno (**11286,5 MJ**) que en el de PEBD (**7471 MJ**). La diferencia energética en ambos procesos está en el mayor consumo de agua de enfriamiento (**254710 lb**) para el proceso de PEBD, equivalente a **4920,5 MJ**. Al realizar el balance energético total (diferencia entre la energía consumida y generada en cada

etapa de los procesos), se observa un desbalance energético del 1,6% en el proceso de Etileno estimado a las pérdidas energéticas de los equipos (compresores, reactores); al igual que en el proceso de PEBD cuyo valor estuvo en 3,24%. (Ver **Tabla 6** y **Tabla 7**).

**Tabla 6. Balance de Energía Global para la Producción de Etileno**

Servicio Industrial	Consumo	Generación	Unidad	Total Energía (MJ)
Energía Eléctrica	3997,8	-	MJ	3997,8
Energía Térmica (vapor)	7289	-	MJ	7288,7
Agua Cruda	35409	-	lb	45236,7
Agua Industrial	1809467	-	lb	885,2
Gas de Pirólisis	1,4229	-	tonelada	-3464,5
Gas Combustible	5281	-	Lb	-303,9
<b>Subtotal</b>				<b>53640,0</b>
Condensado	-	32982,18	lb	4676,9
Agua (caliente)	-	1791372,42	lb	48045,6
Etileno	-	1,0010	tonelada	60,4
<b>Subtotal</b>				<b>52782,9</b>
<b>Desbalance Energético (%):</b>				<b>1,6</b>

Fuente: Datos de la Industria

**Tabla 7. Balance de Energía Global para la Producción de PEBD**

Consumo				
DESCRIPCIÓN	Masa (lb/h)	tonelada/h	ENERGIA (BTU/h)	ENERGIA (MJ/h)
Carga de etileno a la Unidad	6190,027	1,1174	-63916,085	-67,435
Vapor 25 psig	7122,615	1,2858	3308140,534	3490,274
Vapor 150 psig	2469,173	0,4457	1172327,688	1236,871
Agua de enfriamiento (fría)	2099586,310	379,0141	48378862,306	51042,409
Energía eléctrica	-	-	2600888,971	2744,084
		<b>Total</b>	<b>58446,20</b>	<b>58446</b>
Generación				
DESCRIPCIÓN	Masa (lb/h)	tonelada/h	ENERGIA (BTU/h)	ENERGIA (MJ/h)
Polietileno	5479,902	0,9892	117389,220	123,852
Grasas	41,647	0,0075	3290,290	3,471
Scrap	16,091	0,0029	344,704	0,364
Agua de enfriamiento (caliente)	2069901,950	373,6555	52618950,420	55515,939
Condensado 25 psig	7021,914	1,2676	656456,910	692,599
Condensado 150 psig	2434,263	0,4394	327146,445	345,158
Reciclo de etileno a la U-4100	648,183	0,1170	1287,098	1,358
		<b>Total</b>	<b>58446,20</b>	<b>56555</b>
<b>Desbalance Energético (%):</b>				<b>3,24</b>

Fuente: Datos de la Industria

En la **Tabla 8** se presenta la generación de energía eléctrica y térmica anual obtenida de una refinería a partir de gases y crudo.

**Tabla 8. Estimación de la Energía generada en la termoeléctrica de una refinería.**

Tipo de Energía	(MW-h/año)		MJ/año		Porcentaje	
	ENERGÍA GENERADA		ENERGÍA GENERADA		(%) DE ASIGNACIÓN	
	Energía Neta	Energía Primaria	Energía Neta	Energía Primaria	Asignación-Neta	Asignación-Primaria
<b>E. Eléctrica</b>	6,67E+05	4,52E+06	2,40E+09	1,63E+10	9,14%	29,18%
<b>E. Térmica-Vapor</b>	6,63E+06	1,10E+07	2,39E+10	3,95E+10	90,86%	70,82%

<b>Total</b>	<b>7,30E+06</b>	<b>1,55E+07</b>	<b>2,63E+10</b>	<b>5,58E+10</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>
--------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	---------------	---------------

Fuente: Datos de la Industria

Para dar cumplimiento al Inventario de Ciclo de Vida, según el alcance del estudio (puerta a puerta), se presenta el consumo de agua de enfriamiento (básicamente para enfriamiento en el barril en la zona de entrada) ver **Tabla 9** y de energía eléctrica utilizados en la transformación (extrusión blown film) de PEBD en películas (ver **Tabla 10**).

**Tabla 9. Consumo Agua Enfriamiento para el Sistema Extrusión PEBD - Cliente**

Equipo	Factor (lb/h)	Consumo Agua gpm
Enfriamiento barril del extrusor*	3260	6,52
<b>Total</b>		<b>6,52</b>

\* (Chiller Tonnage Design Parameters for the Plastics Industry.)

**Tabla 10. Consumo Energía Eléctrica para el Sistema Extrusión PEBD - Cliente**

Equipo	Factor (MJ/t PE)	Consumo Energía MJ
Extrusora*	1077,6183	1066,0051
Equipos Complementarios*	3771,6639	3731,0179
<b>Total</b>		<b>4797,0230</b>

\* (THERMAL TECH EQUIPMENT Co. Inc. Engineering Formulas . (s.f.)) \*\* (Temperature corporation. Load Sizing Chillers. (s.f.))

#### 4.2.3.1. Proceso de transporte de pellets

El transporte del polietileno en pellets, desde la unidad de producción hasta la entidad de transformación del pellets en película soplada, hace parte de la frontera del estudio. Por consiguiente esta unidad es considerada como un proceso unitario, dentro del contexto de evaluación de impactos en el Análisis de Ciclo de Vida.

En la **Tabla 11** se presenta el consumo de combustible ACPM (litros), utilizado para transportar 1 tonelada de PEBD a cuatro destinos locales (Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín). El consumo de combustible fue determinado según la distancia recorrida (km) a cada destino, con velocidad promedio de 60 km/h, por dos Tracto Camiones: tipo N (capacidad de transportar 30 toneladas PEBD) y tipo V (capacidad de transportar 33 toneladas PEBD). Los vehículos se diferencian por la capacidad de producto a transportar y la cantidad en consumo de combustible.

**Tabla 11. Consumo de Combustible (ACPM) para transportar 1 tonelada PEBD**

Ciudad	Distancia (km)	Consumo ACPM (litros)/tonelada PE
--------	----------------	-----------------------------------

		Tractor N	Tractor V
Barranquilla	633	12,1133	12,9622
Bogotá	477	15,1416	14,9122
Cali	713	18,9271	19,5006
Medellín	343	11,9871	12,6180

Fuente: Empresa de Carga Copetran.

#### 4.2.4. Escenarios de Comparación y Árbol de Procesos.

El ACV realizado tiene una perspectiva comparativa y considera dos principales escenarios de comparación son:

- ❑ Resultados del Modelo obtenido (caso línea base), para el sistema objeto de estudio basado en datos de la industria, contextualizada al caso de Sur América versus los resultados de un proceso unitario estándar para la producción de PEBD reportado en las bases de datos ambientales para el contexto europeo (modelo europeo-Suecia).
- ❑ Resultados del Modelo de línea base que incluye como fuente de electricidad la producción termoeléctrica on-site, como ocurre típicamente con los procesos petroquímicos embebidos en unidades de refinación de crudo, versus los resultados obtenidos para un Modelo hipotético de producción de PEBD importando energía eléctrica de la matriz eléctrica local, que en el caso de Sur América es predominantemente la energía hidroeléctrica.

Una vez definido cada modelo, se crearon los ensamblajes (subprocesos, cajas de color azul) como fueron el cracking de etano/nafta, la polimerización de etileno, el transporte de pellets y la extrusión del polietileno en película soplada. Posteriormente, se ingresaron los inventarios (balances máxicos y energéticos en unidades de proceso, cajas de color gris) al software, que internamente, lleva a cabo la etapa de clasificación; asignando la contribución de salida a las categorías de impacto correspondiente. En cada montaje (escenario) establecido en el estudio, se presentan los valores obtenidos (impactos ambientales potenciales), según las categorías de impacto de punto medio seleccionadas (calentamiento global, energía no renovable, inorgánicos respirados, orgánicos respirados, acidificación acuática), con su respectiva unidad.

Con el fin de visualizar la contribución ambiental de los subprocesos ensamblados en el estudio, se presenta a continuación el árbol de procesos (ver **Figura 11**; Error! No se encuentra el origen de la referencia.) y la interpretación de los resultados (ver **Tabla 12**), del modelo de línea base, para la producción de PEBD utilizando energía de origen termoeléctrico. Algunos subprocesos como la compresión primaria en el proceso de polimerización de etileno no se podrán observar en la imagen, debido al valor de corte (1,0% de visualización del Software).



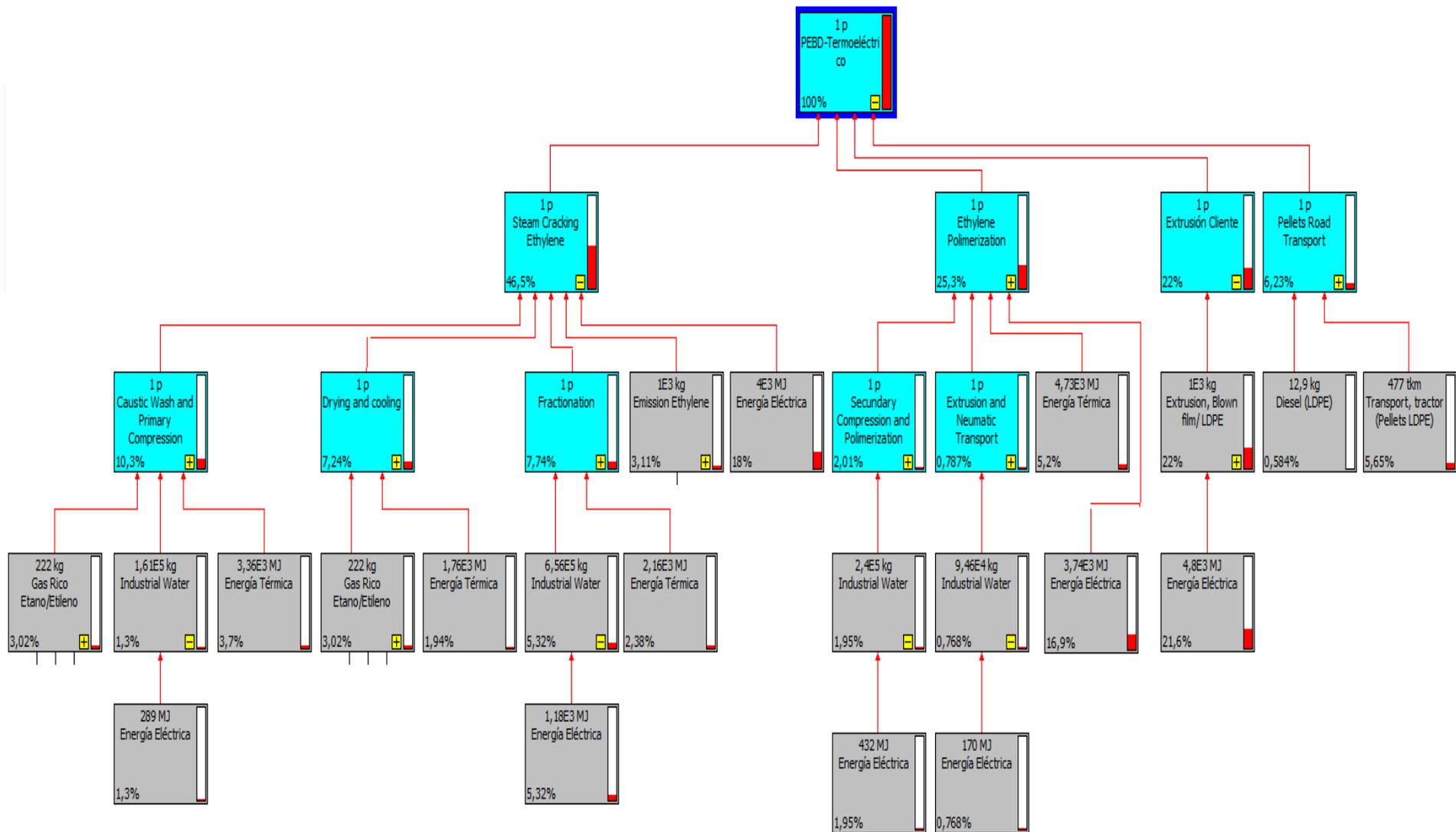


Figura 11. Árbol Global del Ciclo de Vida para la Producción de PEHD, Modelo Base (Corte de Visualización del 1,0 %). (Simapro 7.1)

El valor de cada impacto, está dado en unidades mPt (midpoint), según la puntuación única del proceso, y los resultados obtenidos por el método empleado. El valor absoluto de los puntos, no es muy relevante ya que el propósito principal es para comparar las diferencias relativas entre los productos o componentes. La escala que se elige a través del método, es de tal manera que, el valor de Pt representa 1 centésima parte de la carga ambiental de un ciudadano medio europeo. Cuanto mayor es el Eco-indicador, mayor es el impacto ambiental (Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment , 2000). De los resultados se observa que el 46,5% de la carga ambiental total, evaluadas en Pt, corresponde al proceso de obtención de Etileno (mayor consumo de energía eléctrica y térmica, consumo de materias primas y emisiones generadas en el proceso); seguido del proceso de polimerización del etileno con un 25,3% de la carga ambiental asociada al consumo de servicios industriales (energía eléctrica y térmica); continua el proceso de extrusión del polietileno con una carga ambiental del 22% atribuida al consumo de energía eléctrica y finalmente la contribución del 6,23 % de la carga asociada al transporte del pellet (distancia de 477 km) por las emisiones generadas en la combustión del ACPM. Las contribuciones de cada proceso, se presentan y validan en la **Tabla 12**.

**Tabla 12. Contribución Ambiental Global, del Modelo local de Producción de PEBD.**

Unidad / Proceso	Contribución Ambiental por cada Proceso (mPt)			
	Steam Cracking Ethylene	Ethylene Polymerization	Extrusión Cliente	Pellets Road Transport
Energía Eléctrica	169,3375	136,4416	147,5843	2,77E-04
Energía Térmica	54,7070	35,4780	-	-
Gas Rico Etano/Etileno	41,1890	-	-	-
Emission Transport, tractor (Pellets)	-	-	-	38,5157
Emission Ethylene	21,2194	-	-	-
UOP I	12,5342	-	-	-
Carga de Etano	10,0982	-	-	-
UOP II	7,3792	-	-	-
Emission Diesel (LDPE)	-	-	-	3,9817
Extrusion, Blown film/ LDPE	-	-	2,6542	-
Reciclo Polietileno	-	5,06E-01	-	-
Polyethylene Recycle	4,23E-01	-	-	-
Emission Polyethylene, LDPE, Pellets	-	3,34E-02	-	-
TBPP	-	1,08E-02	-	-
TBPA	-	3,18E-03	-	-
Oil	-	1,41E-04	1,68E-09	-
<b>Total (mPt)</b>	<b>316,8878</b>	<b>172,4735</b>	<b>150,2385</b>	<b>42,4976</b>
<b>Porcentaje de Contribución Ambiental</b>	<b>46,46%</b>	<b>25,29%</b>	<b>22,03%</b>	<b>6,23%</b>

En la **Figura 12** se presenta el árbol de procesos para el modelo hipotético con energía del mix nacional (energía hidroeléctrica) para la producción de polietileno de baja densidad. Al igual que el caso base, el subproceso de compresión primaria, la extrusión y transporte neumático del polietileno, no se podrán observar en la imagen, debido al valor de corte (1,0% de visualización del Software).

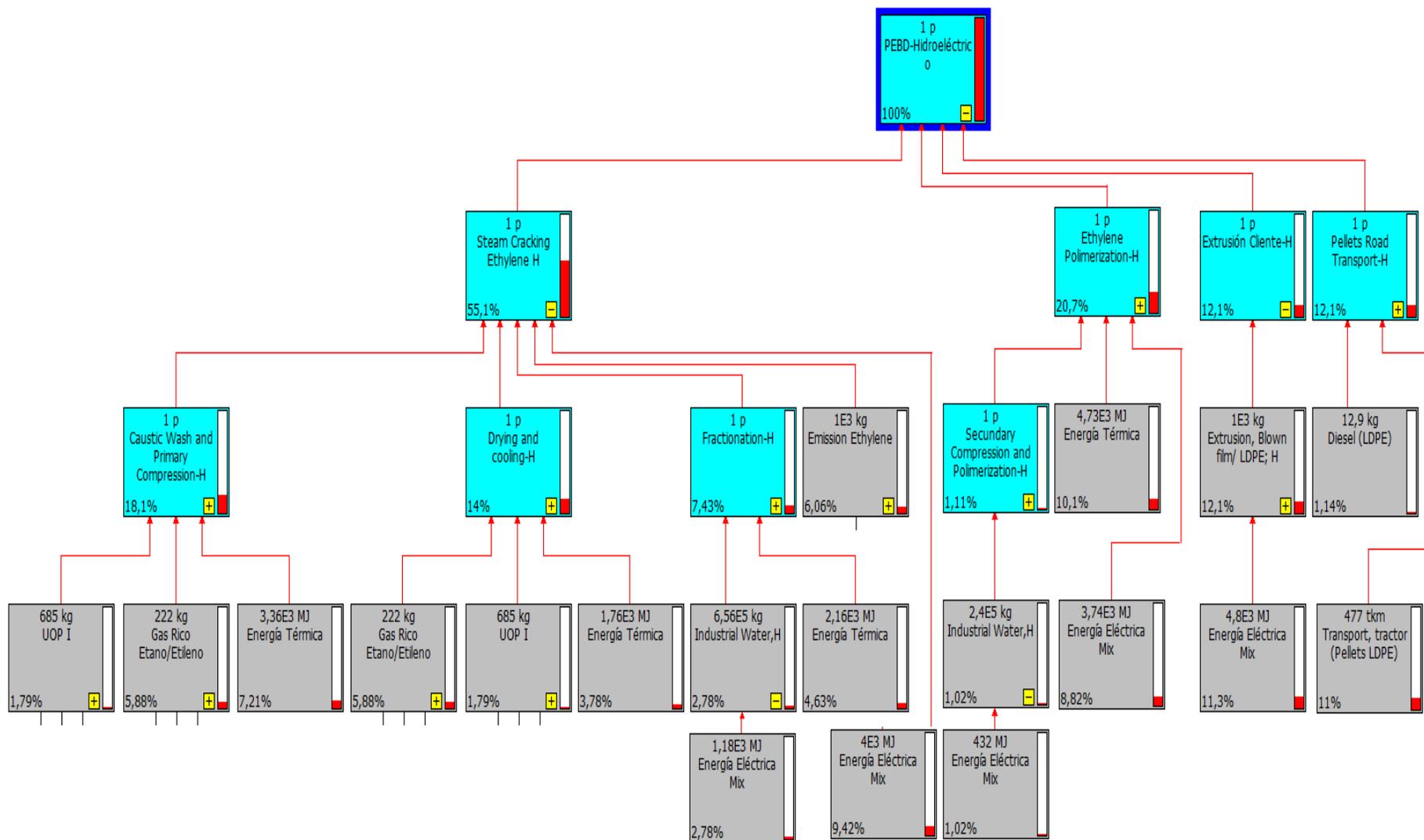


Figura 12. Árbol Global del Ciclo de Vida para la Producción de PEHD, Modelo Hipotético (Corte de Visualización del 1,0 %). (Simapro 7.1)

Según los resultados se establece que el 55% de la carga ambiental total, evaluada en Pt, corresponde al proceso de obtención de Etileno (considerado por el consumo de materias primas, energía eléctrica y térmica y las emisiones generadas en el proceso). Le procede la contribución ambiental del proceso de polimerización del etileno con un 20,7%, asociada al consumo de servicios industriales (energía eléctrica y térmica); seguido de los procesos de transporte y extrusión del PEBD, con una carga ambiental del 12,1% cada uno (atribuida a las emisiones generadas en la combustión del ACPM y al consumo de energía eléctrica en la extrusión). En la **Tabla 13** se presentan las contribuciones por unidad de proceso.

**Tabla 13. Contribución Ambiental Global, del Modelo Hipotético de Producción de PEBD.**

Unidad / Proceso	Contribución Ambiental por cada Proceso (mPt)			
	Steam Cracking Ethylene	Ethylene Polimerization	Extrusión Cliente	Pellets Road Transport
Energía Eléctrica Mix	45,4432	36,6153	39,6055	0,0001
Energía Térmica	54,7070	35,4780	-	-
Gas Rico Etano/Etileno	41,1890	-	-	-
Emission Transport, tractor (Pellets)	-	-	-	38,5157
Emission Ethylene	21,2194	-	-	-
UOP I	12,5342	-	-	-
Carga de Etano	10,0982	-	-	-
UOP II	7,3792	-	-	-
Diesel (LDPE)	-	-	-	3,9817
Emission Extrusion, Blown film/ LDPE	-	-	2,6542	-
Reciclo Polietileno	-	0,5064	-	-
Poliethylene Recycle	0,4233	-	-	-
Emission Polyethylene, LDPE, Pellets	-	0,0334	-	-
TBPP	-	0,0108	-	-
TBPA	-	0,0032	-	-
Oil	-	0,0001	0,0000	-
<b>Total (mPt)</b>	<b>192,9935</b>	<b>72,6472</b>	<b>42,2597</b>	<b>42,4974</b>
<b>Porcentaje de Contribución Ambiental</b>	<b>55,08%</b>	<b>20,73%</b>	<b>12,06%</b>	<b>12,13%</b>

Finalmente en la **Figura 13** se presenta el árbol de procesos para el modelo del contexto europeo (Suecia), el cual utiliza energía mix europea (energía termoeléctrica, eólica y nuclear) para la producción de polietileno de baja densidad. Este modelo no tuvo en cuenta el consumo de agua para los diferentes procesos al igual que la energía térmica (vapor). Es así que en el árbol solo se presentan los ensamblajes y unidades de proceso más importantes. El valor de corte fue del 0,5% según la visualización del Software.

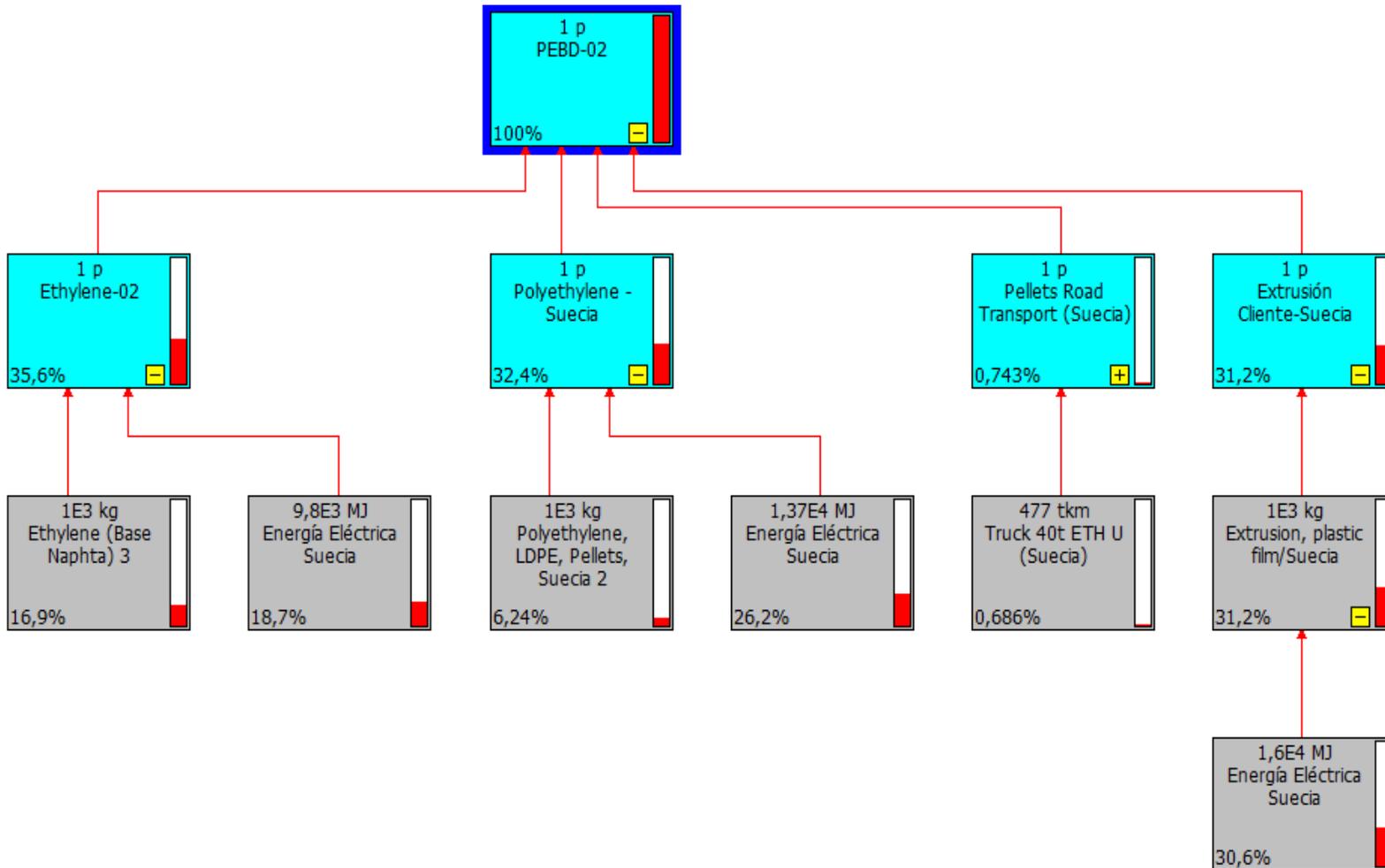


Figura 13. Árbol Global del Ciclo de Vida para la Producción de PEBD, Modelo Contexto Europeo (Corte de Visualización del 0,5 %). (Simapro 7.1)

En la **Tabla 14** se presentan en detalle las contribuciones por unidad de proceso, como se ilustra en la anterior figura. Los resultados obtenidos, permiten establecer que el 35,62% de la carga ambiental total, evaluada en Pt, corresponde al proceso de cracking de nafta para la obtención de Etileno (considerado por el consumo energía eléctrica y de las emisiones generadas en el proceso). Continúa la contribución ambiental del proceso de polimerización de etileno en 32,4%, asociada al consumo de energía eléctrica y a las emisiones del proceso; seguido de la extrusión del PEBD, con una carga ambiental del 31,24% (atribuida a las emisiones generadas por el consumo de energía eléctrica) y finalmente el proceso de transporte con una carga ambiental del 0,74% (relación a la combustión del Diesel).

**Tabla 14. Contribución Ambiental Global, del Modelo Europeo de Producción de PEBD.**

Unidad / Proceso	Contribución Ambiental por cada Proceso (mPt)			
	Steam Cracking Ethylene	Ethylene Polymerization	Extrusión Cliente	Pellets Road Transport
Energía Eléctrica Suecia	338,7147	473,5093	553,0036	-
Emission Ethylene (Base Naphta)	305,8889	-	-	-
Emission Polyethylene, LDPE, Suecia	-	112,8611	-	-
Emission Truck 40t ETH U (Suecia)	-	-	-	12,4181
Extrusion, plastic film/Suecia	-	-	12,3112	-
Diesel I (Suecia)	-	-	-	1,0352
Energía Eléctrica Suecia	-	-	-	0,0003
Water, river	-	-	-	-
<b>Total (mPt)</b>	<b>644,6036</b>	<b>586,3704</b>	<b>565,3148</b>	<b>13,4536</b>
<b>Porcentaje de Contribución Ambiental</b>	<b>35,62%</b>	<b>32,40%</b>	<b>31,24%</b>	<b>0,74%</b>

#### 4.2.5. Fuentes de Datos

El modelo línea base comprende cuatro procesos principales: el craqueo térmico de etano a etileno, la polimerización del etileno a polietileno, el transporte de polietileno en pellets a determinada zona de distribución y la extrusión del polietileno en película a soplada. Para cada proceso en particular se tuvo en cuenta el consumo de servicios industriales (agua de enfriamiento, energía térmica y eléctrica, combustibles) al igual que el consumo de materias primas. El uso de energía eléctrica fue de origen termoeléctrico. La información que permite validar la confiabilidad de los modelos se suministran en la **Tabla 15**.

El modelo hipotético comprende los mismos procesos descritos en el modelo línea base, la diferencia entre los dos modelos radica en el consumo de energía eléctrica, ya que este modelo utiliza energía de origen hidroeléctrico (energía local).

El modelo europeo al igual que los modelos anteriores, comprende de cuatro procesos principales: conversión de nafta (producida en el Medio Oriente y transformada en Europa) a etileno mediante el proceso de cracking, el proceso de polimerización del etileno a polietileno, el transporte de polietileno utilizando como referencia la misma distancia pero diferente tractor (capacidad de 40 toneladas) y las emisiones generadas por la combustión en Europa. Finalmente el proceso de extrusión del pellets en película. Estos procesos utilizaron energía mix de Europa. En este modelo se excluyeron las etapas de extracción y transporte del aceite, desde Arabia Saudita hasta Europa, el procesamiento y refinación del aceite para obtener nafta. Los inventarios que soportan los procesos de comparación se encuentra adjunto en el ¡Error! No se encuentra el origen de a referencia..

**Tabla 15. Descripción de los procesos utilizados en cada modelo referenciado. (Autor)**

Modelo	Procesos	Fuente	Observación
Línea Base	Cracking de Etano	Datos de la Industria	El tipo de energía utilizada proviene de una Termoeléctrica. Se utilizaron los factores de emisión, para cada proceso incluyendo el consumo de Diesel.
	Polimerización de Etileno	Datos de la Industria	
	Transporte Polietileno	Empresa de Transportes y carga Copetran; (Sistema de Información Ambiental Minero Energético)	
	Extrusión en película	Chiller Tonnage Design Parameters for the Plastics Industry; (Southwest Clean Air Energy. , April 16, 2013) ** (Focus on Energy, July 2006)	
Hipotético, Energía local	Cracking de Etano	Datos de la Industria	El tipo de energía utilizada proviene de una Hidroeléctrica. Los impactos asociados al uso de esta energía fueron suministrados por el Dr. Alexander Meneses, como ejercicio práctico en la realización del posgrado.
	Polimerización de Etileno	Datos de la Industria	
	Transporte Polietileno	Empresa de Transportes y carga Copetran; (Sistema de Información Ambiental Minero Energético)	
	Extrusión en película	Chiller Tonnage Design Parameters for the Plastics Industry; (Southwest Clean Air Energy. , April 16, 2013) ** (Focus on Energy, July 2006)	
Europeo	Cracking de Nafta	Christin Liptow Tillman, 2009)	El tipo de energía utilizada fue una energía mix europea (Nuclear, eólica). En los procesos no se tuvo en cuenta el consumo de energía térmica, sino un total en energía eléctrica.
	Polimerización de Etileno	Christin Liptow Tillman, 2009)	
	Transporte Polietileno	Unidad de proceso utilizado de Simapro Truck 40t ETH-ESU 96 Unit process, Germany. Consumo de Diesel Europeo.	
	Extrusión en película	Unidad de proceso utilizado de Simapro Ecoinvent Unit process, European	

#### 4.2.6. Limitaciones del Estudio

En cada modelo de estudio, solo se tuvieron en cuenta los impactos ambientales generados en el proceso de obtención de la materia prima (etileno ya sea del cracking de etano o nafta), la polimerización del etileno (emisión de etileno y material particulado), el transporte de pellets (emisión por la combustión de diesel) y la extrusión de película soplada (emisión de material particulado y de compuestos orgánicos volátiles). De igual

forma, se asocian los impactos emitidos por el consumo de energía eléctrica, independiente de su origen.

El modelo europeo no tuvo en cuenta los impactos asociados al consumo de energía térmica (vapor), al consumo de agua y combustibles requeridos en los procesos. Solo se atribuyen los impactos por consumo de energía eléctrica.

No se contempla el estudio y evaluación de afectación de los impactos ambientales asociados a las categorías de punto final (categorías de daño). Esta consideración es con base, en que no se estudian las 14 categorías de punto medio; solo seis categorías se evalúan, como se define en la selección de categorías.

Se reitera que no se consideran los impactos ambientales asociados a la extracción y refinación del crudo, la obtención de nafta, hidrocarburos, gas combustible, producción de diesel, transporte de materias primas, producción de químicos, aditivos, iniciadores y catalizadores, fabricación y mantenimiento de vehículos, y los impactos asociados a los procesos de infraestructura.

Al utilizar los procesos de ensamble para el modelo europeo (transporte de polietileno, uso del diesel, extrusión blown film) adscritos al software, no se consideraron los impactos que atribuyen indirectamente el proceso (obtención de materias primas, infraestructura, equipos y maquinarias, etc.).

No se consideraron los impactos asociados a los vertimientos en fuentes hídricas y a los residuos sólidos generados en los procesos que intervienen para la producción de polietileno de baja densidad.

#### 4.2.7. Evaluación de Flujos Ambientales

Una vez realizada la recopilación de los datos, se cuantifican los flujos ambientales, asociados a cada etapa del sistema considerada en el ciclo de vida del PEBD. De forma práctica se definen las “cargas ambientales”, es decir, las emisiones gaseosas, vertimientos, residuos sólidos, consumo de recursos no renovables, ruido, etc. De las **Tabla 16** a la **Tabla 20**, se presentan las emisiones globales generadas para la obtención de 1 tonelada de Etileno, 1 tonelada de PEBD y el consumo de energía eléctrica y térmica. Estos impactos se tienen en cuenta para todos los procesos involucrados según el alcance del estudio.

**Tabla 16. Emisiones generadas en la Unidad de Etileno**

Contaminante	Etileno (t)	Factor (lb/t Etileno)	Emisión (lb)
CO	1,0010	0,002	0,0020
NO <sub>x</sub>	1,0010	0,002	0,0020

MP filtrable	1,0010	0,002	0,0020
SO <sub>x</sub>	1,0010	6	6,0062

Fuente: Datos de la Industria

Tabla 17. Emisiones generadas en la Unidad de PEBD

Contaminante	PE (tonelada)	Factor (lb/t PE)	Emisión (lb)
MP Filtrable	0,9892	0,6600	0,6529
Etileno	0,9892	0,1200	0,1187

Fuente: Datos de la Industria

Tabla 18. Emisiones generadas en la producción de Energía Eléctrica y Térmica.

SUSTANCIAS	EMISIONES (t/año )			EMISIONES (Sustancia/Energía)	
	Directas	Indirectas	Totales	t/MWh	t/MJ
NO <sub>x</sub>	2,97E+03	8,10E-01	2,97E+03	4,06E-04	1,13E-07
CO	9,87E+02	1,93E+00	9,89E+02	1,36E-04	3,76E-08
SO <sub>x</sub>	1,12E+02	1,47E-01	1,12E+02	1,53E-05	4,25E-09
MP	1,13E+02	2,38E-01	1,13E+02	1,55E-05	4,32E-09
VOC	6,82E+01	2,48E+01	9,30E+01	1,27E-05	3,54E-09
CO <sub>2</sub>	2,05E+06	3,66E+02	2,05E+06	2,81E-01	7,80E-05
N <sub>2</sub> O	2,13E+01	4,31E-03	2,13E+01	2,92E-06	8,12E-10
CH <sub>4</sub>	3,06E+01	2,43E+02	2,73E+02	3,74E-05	1,04E-08

Fuente: Datos de la Industria

En el ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se describe en detalle el proceso para la determinación de las emisiones asociadas al transporte del PEBD en pellets y a la transformación del mismo en película soplada. Los factores de emisión están referenciados según las fuentes objeto de estudio.

Tabla 19. Emisiones generadas en el transporte de PEBD, por medio Tracto Camión tipo N

Emisiones Uso de Tracto Camión Tipo N					
Contaminante	Factor (kg/L)	Barranquilla	Bogotá	Cali	Medellín
Kg CO <sub>2</sub> /L	2,7700	33,5539	41,9424	52,4280	33,2044
Kg CH <sub>4</sub> /L	0,0001	0,0017	0,0021	0,0026	0,0017
Kg N <sub>2</sub> O/L	0,0001	0,0017	0,0021	0,0026	0,0017
Kg NO <sub>x</sub> /km	0,0038	2,3751	1,7898	2,6753	1,2870
Kg CO/km	0,0016	0,9871	0,7438	1,1118	0,5349
Kg SO <sub>x</sub> /km	0,0002	0,1049	0,0790	0,1181	0,0568
Kg MP/km	0,0003	0,1844	0,1389	0,2077	0,0999

Fuente: (Sistema de Información Ambiental Minero Energético)

Tabla 20. Emisiones generadas en la Extrusión (Film de PEBD)

Contaminante	Factor	Emisión (lb)
lb VOCs /tonelada PE *	0,028334879	0,028030
lb PMs /tonelada PE *	0,059905037	0,059259

lb Ozono/kWh tratador*t PE **	0,072	0,00072
<b>Total</b>		<b>0,088009</b>

\* (Southwest Clean Air Energy. , April 16, 2013) \*\* (Focus on Energy, July 2006)

#### 4.3. SELECCIÓN DEL MÉTODO Y LAS CATEGORÍAS DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Con base en el estado del arte, se ha elaborado la **Tabla 21** que compila los principales métodos de evaluación de impacto y las categorías de impacto ambiental de punto medio y de punto final o de daño, que han sido utilizadas de manera más frecuente en estudios previos de ciclo de vida sobre la producción de PEBD.

A partir de esta orientación de la literatura y de estudios de ACV similares aplicados a refinerías, se ha considerado pertinente acotar el estudio al análisis de siguientes seis categorías de impacto principales:

- Calentamiento global
- Inorgánicos Respirados
- Orgánicos Respirados
- Acidificación y Nutricación Terrestre
- Acidificación Acuática
- Energía no renovables

Estas categorías de impacto serán evaluadas según el método Impact 2002+ V2.05, que además de las categorías requeridas por el estudio, incluye otras 8 categorías de impacto para punto medio, para un total de 14; así como cuatro categorías de daño. Un indicador de punto medio caracteriza a los flujos elementales y otras intervenciones ambientales que contribuyen a un mismo impacto. El término "Punto medio" expresa el hecho de que este punto está localizado en alguna parte, en una posición intermedia entre los resultados del ICV y el daño (o punto final) en la valoración de la ruta de impacto. Una explicación ampliada del significado de cada una las categorías de impacto que serán analizadas en este trabajo, se proporcionan en el ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

El método Impact 2002+ hace parte de la base de datos y utilidades de la herramienta informática utilizada en la ejecución de este estudio, el software SimaPro 7.1, desarrollado por la firma Pré Consultants, el cual también tiene interfase con la principal base de datos ambientales a nivel mundial, Ecoinvent.

**Tabla 21. Resumen de Categorías de Impacto según revisión de Estado Arte. (Autor)**

Año	Autor	Categorías de Impacto Punto Medio	Categoría de Daño	Sustancia de Referencia	Software	Método	
1	2005	Boustead I, European Plastics Industry.	Agotamiento Capa de ozono Energías no renovables Acidificación Calentamiento global Ecotoxicidad Acuática Eutrofización Toxicidad humana	Salud Humana Recursos Calidad del Ecosistema Cambio Climatico Calidad del Ecosistema Calidad del Ecosistema Salud Humana	kgeq CFC-11 al Aire MJ primario no renovable o kgeq crudo (860 kg/m3) kgeq SO2 al Aire kgeq CO2 al Aire kgeq Trietilenglicol en Agua kgeq PO4 al Agua kgeq Cloroetileno en Aire	Simapro Versión 7.0	Impact 2002+
2	2007	K.G. Harding J.S. Dennis, H. von Blotnitz, S.T.L. Harrison.	Calentamiento global Agotamiento Capa de ozono Ecotoxicidad Terrestre Ecotoxicidad Acuática Toxicidad humana Energías no renovables	Cambio Climatico Salud Humana Calidad del Ecosistema Calidad del Ecosistema Salud Humana Recursos	kgeq CO2 al Aire kgeq CFC-11 al Aire kgeq Trietilenglicol en Agua kgeq Trietilenglicol en Agua kgeq Cloroetileno en Aire MJ primario no renovable o kgeq crudo (860 kg/m3)	Simapro Versión 7.0	CML 2, línea base 200 versión 2.03
3	2008	Boustead I, European Plastics Industry.	Calentamiento global Acidificación Oxidación Fotoquímica Toxicidad humana Eutrofización	Cambio Climatico Calidad del Ecosistema Salud Humana ; Calidad Ecosistema Salud Humana Calidad del Ecosistema	kgeq CO2 al Aire kgeq SO2 al Aire kgeq Etileno en Agua kgeq Cloroetileno en Aire kgeq PO4 al Agua	Simapro Versión 7.0	Impact 2002+
4	2011	Christin Liptow Tillman and Anne Mari	Acidificación Eutrofización Oxidación Fotoquímica	Calidad del Ecosistema Calidad del Ecosistema Salud Humana ; Calidad Ecosistema	kgeq SO2 al Aire kgeq PO4 al Agua kgeq Etileno en Agua	NA	CML, Ecoindicador 99
5	2012	Christin Liptow Tillman and Anne Mari	Calentamiento global Acidificación Oxidación Fotoquímica Eutrofización	Cambio Climatico Calidad del Ecosistema Salud Humana ; Calidad Ecosistema Calidad del Ecosistema	kgeq CO2 al Aire kgeq SO2 al Aire kgeq Etileno en Agua kgeq PO4 al Agua	NA	CML
6	2012	Ruban Anna	Energías no renovables Calentamiento global Respiratorios Inorgánicos Carcinógenos Uso del suelo	Recursos Cambio Climatico Salud Humana Salud Humana Calidad del Ecosistema	MJ primario no renovable o kgeq crudo (860 kg/m3) kgeq CO2 al Aire kgeq PM 2,5 en Aire kgeq Cloroetileno en Aire m2 eq tierra orgánica arable año	Simapro Versión 7.3	Impact 2002+
7	2014	Valentina Siracusa Carlo Ingraio, Agata Lo Giudice, Charles Mbohwa, Marco Dalla Rosa	Energías no renovables Calentamiento global Toxicidad humana Acidificación	Recursos Cambio Climatico Salud Humana Calidad del Ecosistema	MJ primario no renovable o kgeq crudo (860 kg/m3) kgeq CO2 al Aire kgeq Cloroetileno en Aire kgeq SO2 al Aire	Simapro Versión 7.1	Impact 2002+; Ecoinvent versión 2.2

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La producción de Polietileno de Baja Densidad, implica la unión de varios productos elaborados en diferentes unidades de proceso. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la etapa de evaluación de impactos, comenzando por el producto de interés (Polietileno de Baja densidad), seguido de la evaluación del proceso de obtención de materia prima (Etileno), junto al proceso de transporte y distribución de pellets de PEBD a cuatro diferentes localidades (igual velocidad en el recorrido y consumo del mismo combustible), para finalmente presentar el proceso de extrusión del polímero por el cliente (transformación de pellets en película soplada). Los resultados se presentan en esta instancia para una tonelada de PEBD, en relación al consumo de energía eléctrica (MJ) proveniente de una termoeléctrica. El modelo obtenido será modificado en la energía eléctrica (térmica por hídrica) y posteriormente se comparan los dos modelos respecto a la contribución ambiental. Finalmente el modelo 1 (energía Térmica) será comparado con un tercer modelo obtenido, mediante la revisión del estado de arte (datos de literatura y Software).

### 5.1. EVALUACIÓN DE IMPACTOS POTENCIALES CASO LÍNEA BASE

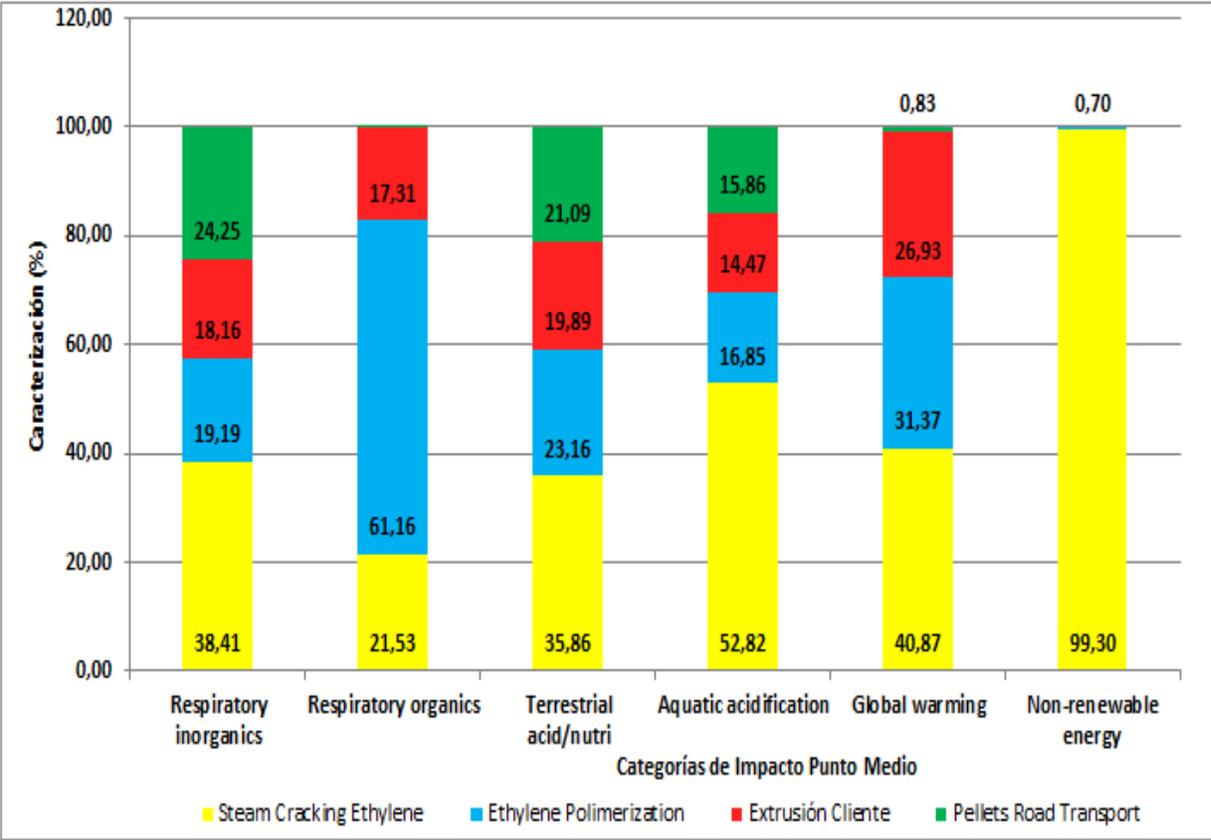
#### 5.1.1. Análisis de Caracterización

En la **Tabla 22** y **Figura 14**, se presenta la caracterización de los Impactos Ambientales Potenciales, asociados por cada unidad de proceso, para la producción de 1 tonelada de Polietileno de Baja Densidad, caso base (energía termoeléctrica). Según el aporte a las categorías de impacto evaluadas. Las categorías de impacto a evaluar son las que representan mayor contribución ambiental, como se observa en la tabla.

**Tabla 22. Impacto Ambiental Global, del Modelo local de Producción de PEBD**

Categoría de impacto	Unidad	Total	Steam Cracking Ethylene	Ethylene Polimerization	Extrusión Cliente	Pellets Road Transport
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	1,5873	0,6096	0,3046	0,2882	0,3849
Respiratory organics	kg C2H4 eq	0,1226	0,0264	0,0750	0,0212	0,0000
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	48,0744	17,2392	11,1361	9,5597	10,1394
Aquatic acidification	kg SO2 eq	8,8214	4,6596	1,4866	1,2762	1,3990
Global warming	kg CO2 eq	4451,6189	1819,5954	1396,3963	1198,6249	37,0023
Non-renewable energy	MJ primary	10962,0518	10885,0910	76,9608	0,0000	0,0000

En la **Figura 14** se logra apreciar que el subproceso de steam cracking (conversión del gas etano a etileno), es el que presenta el mayor porcentaje de impacto para cada una de las categorías estudiadas (asociado a que es el subproceso que consume mayor energía térmica y eléctrica y materias primas, comparada a los otros subprocesos). Le precede el subproceso de polimerización de etileno, luego del proceso de extrusión del pellets en película y finalmente la contribución por el transporte del polietileno a determinada localidad. Las categorías que tuvieron mayor incidencia en el proceso global, fueron el calentamiento global (4451 kg CO<sub>2</sub>eq) y la energía no renovable (10962 MJ primaria).

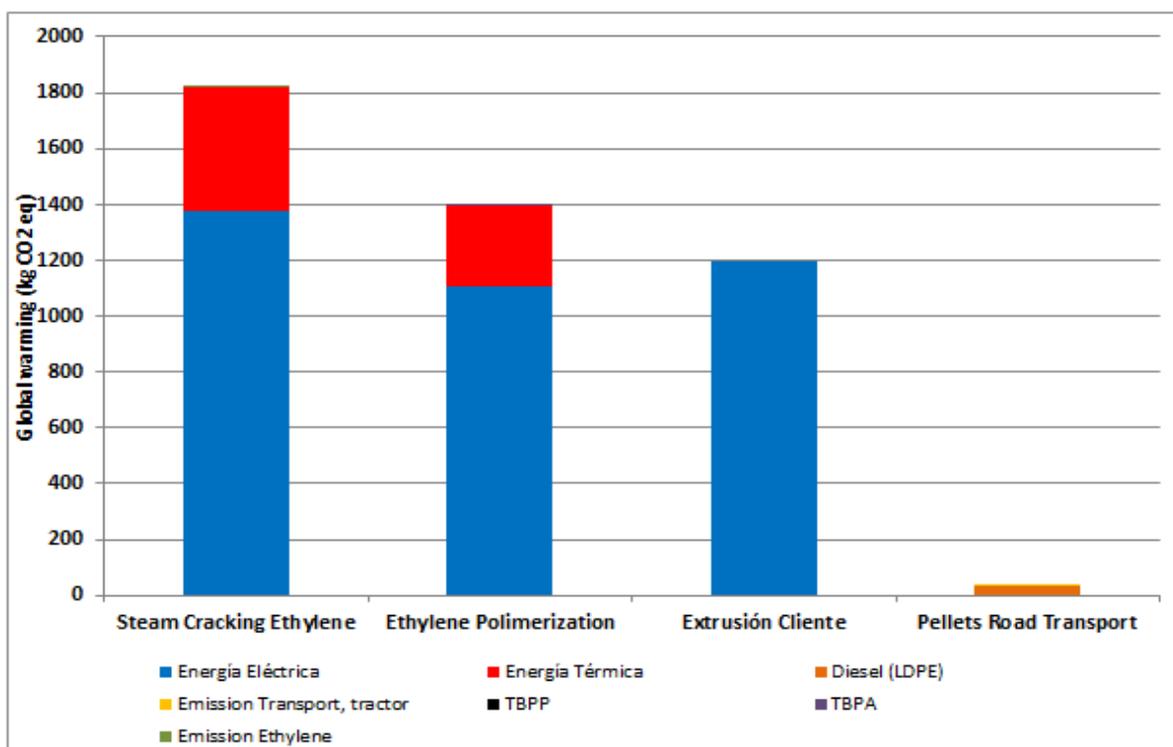


**Figura 14. Caracterización de Impactos Ambientales Global, Modelo local de PEBD. (Autor)**

**5.1.2. Análisis de Contribución – Categoría Calentamiento Global**

Dando continuidad a la evaluación e interpretación de resultados, se describe a continuación el perfil medioambiental (análisis de contribución por procesos) de cada subproceso (sub-ensamblaje), para el ciclo de vida (puerta a puerta) en la producción de polietileno de baja densidad, modelo base local. La primera categoría con mayor

afectación en el proceso, fue el calentamiento global, impactado directamente por las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno, referente al consumo de energía eléctrica y energía térmica en los procesos de refinería (craqueo térmico, polimerización y extrusión), ver **Figura 15**. El valor de contribución global fue de **4451,6189 kg CO<sub>2</sub>eq**, entre todos los subprocesos. Las tablas de contribución para cada categoría de impacto, se encuentran en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



**Figura 15. Perfil medioambiental del Calentamiento Global, Modelo local de PEBD. (Autor)**

### 5.1.3. Análisis de Contribución – Categoría Acidificación y Nutricación terrestre.

En la **Figura 16** se presenta la contribución del impacto asociado a la categoría de acidificación y nutricación terrestre, generado por las emisiones de óxidos de sulfuros al aire en los procesos que consumen energía eléctrica y térmica (craqueo térmico de etano, polimerización de etileno y la extrusión de película soplada), emisiones para la obtención de etileno y el transporte del polietileno (emisiones por causa de la combustión del ACPM). El valor de contribución global fue de **48,0744 kg SO<sub>2</sub>eq**, entre todos los subprocesos.

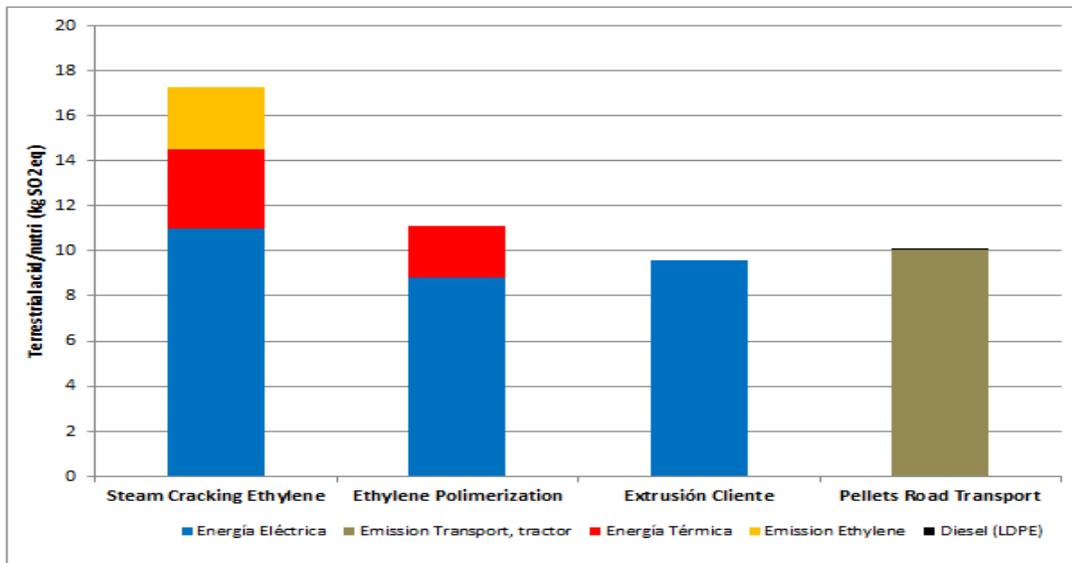


Figura 16. Perfil medioambiental de la acid/nutri terrestre, Modelo local de PEBD. (Autor)

#### 5.1.4. Análisis de Contribución – Categoría Energía no renovable

Posterior a esta categoría, se evalúa la categoría de energía no renovable en la **Figura 17**, quién es impactada por el consumo de materias primas de origen fósil (hidrocarburos: etano, propano y butano en estado gaseoso, entre otros) en los subprocesos de cracking de etano y polimerización del etileno. El valor de contribución global fue de 10962,0518 MJ de energía primaria.

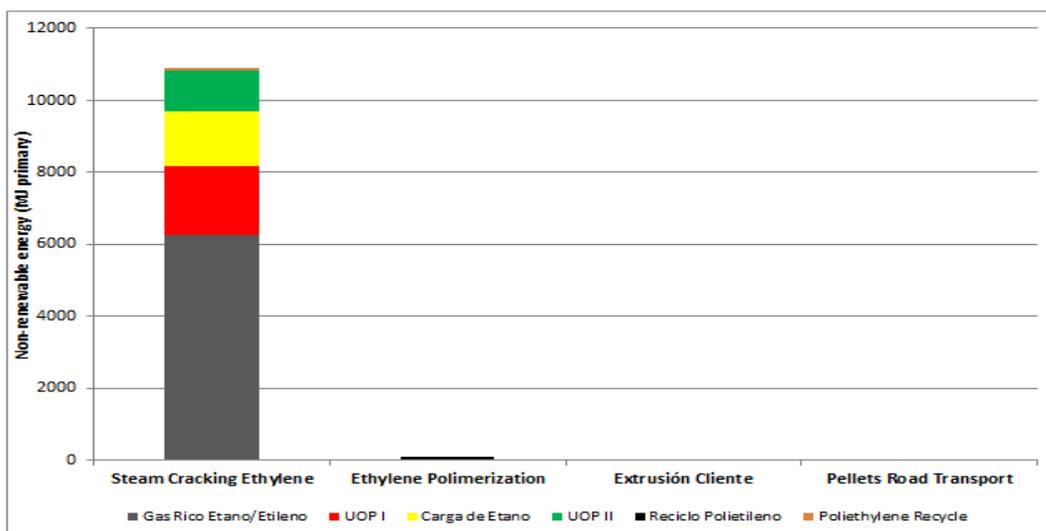


Figura 17. Perfil medioambiental de la energía no renovable, Modelo local de PEBD. (Autor)

### 5.1.5. Análisis de Contribución – Categoría Acidificación Acuática

La siguiente categoría de afectación, fue la acidificación acuática. Como se puede observar en la **Figura 18**, este impacto es atribuido por el contaminante  $SO_x$  emitido al aire al igual que en la categoría de acidificación y nutrificación terrestre, aunque con menor valor de afectación: 8,8214 kg  $SO_2$ eq

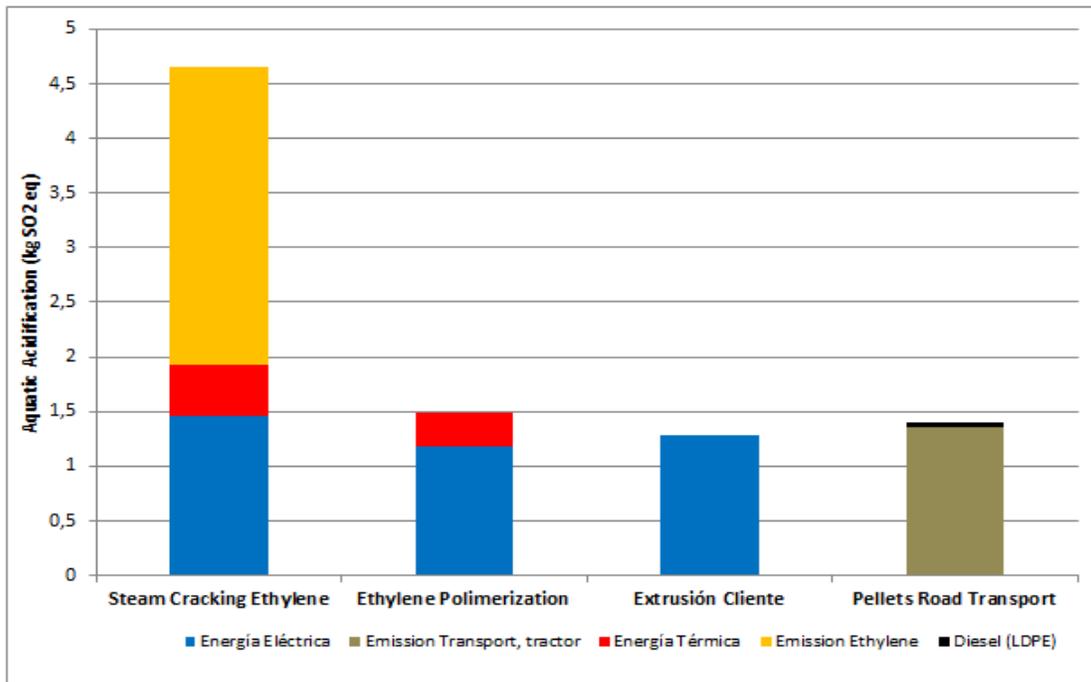


Figura 18. Perfil medioambiental de acidificación acuática, Modelo local de PEBD. (Autor)

### 5.1.6. Análisis de Contribución – Categoría Inorgánicos Respirados

Por último se presenta la contribución en las categorías con menor impacto. En la **Figura 19** se visualiza el aporte hacia la categoría de Inorgánicos Respirados atribuidos principalmente por las emisiones de material particulado, asociados en la producción y consumo de energía eléctrica, las emisiones para la obtención de etileno, la pelusa en el proceso de polimerización de etileno y las emisiones por causa de la combustión del ACPM, utilizado en el transporte del polietileno. Esta categoría contribuye con una carga de 1,5873 kg  $PM_{2.5}$ eq.

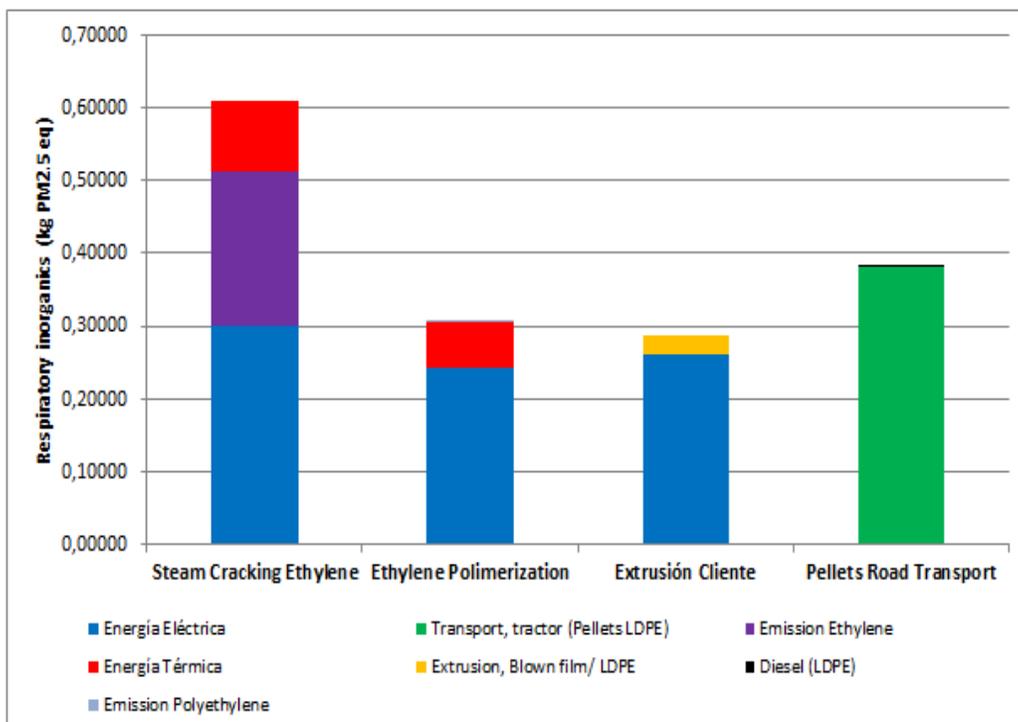


Figura 19. Perfil medioambiental de Inorgánicos Respirados, Modelo local de PEBD. (Autor)

### 5.1.7. Análisis de Contribución – Categoría Orgánicos Respirados

Respecto a la última categoría con menor impacto, se presenta en la **Figura 20** la contribución de la categoría respirados orgánicos. Este impacto obedece a las emisiones de Etano y etileno, generadas en la unidad de cracking de etano, durante los procesos de reciclos entre las unidades de etileno y polietileno, y durante la extrusión del polietileno (el pellets absorbe etileno y lo libera cuando este es fundido). El valor que asocia esta categoría fue de 0,1226 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>eq. Todos los impactos generados en cada categoría, están relacionados directamente a la producción de 1 tonelada de etileno para producir 1 tonelada de polietileno de baja densidad.

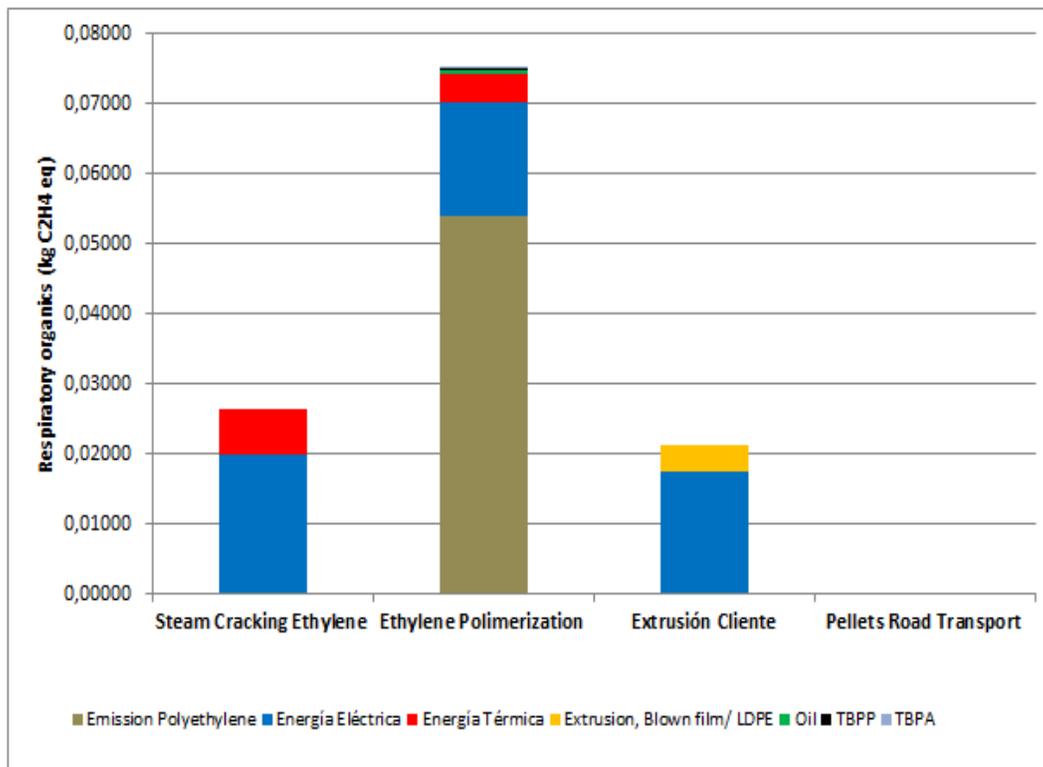


Figura 20. Perfil medioambiental de Orgánicos Respirados, Modelo local de PEBD. (Autor)

### 5.1.8. Análisis de Ponderación, modelo línea base.

Se realizó la ponderación de los impactos potenciales para el modelo base, obteniendo **682,10 mPt**, como contribución ambiental global del ciclo de vida para el modelo base. La mayor contribución de impactos obedece al consumo de energía eléctrica y térmica, en la categoría de Calentamiento Global (**449,61 mPt**), seguido de los Inorgánicos respirados (**156,67 mPt**) y de la energía no renovable (**72,13 mPt**) ver **Figura 21**. Las otras categorías que tuvieron menor impacto en el proceso fueron: la Acidificación y Nutricación terrestre (**3,65 mPt**) y Orgánicos respirados (**0,0368 mPt**).

Posteriormente, se evalúa la ponderación de los impactos ambientales para cada subproceso, que en conjunto permiten detallar la contribución ambiental en el ciclo de vida del PEBD (Ver el análisis adicional). En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se reporta el inventario de contribución global para el proceso.

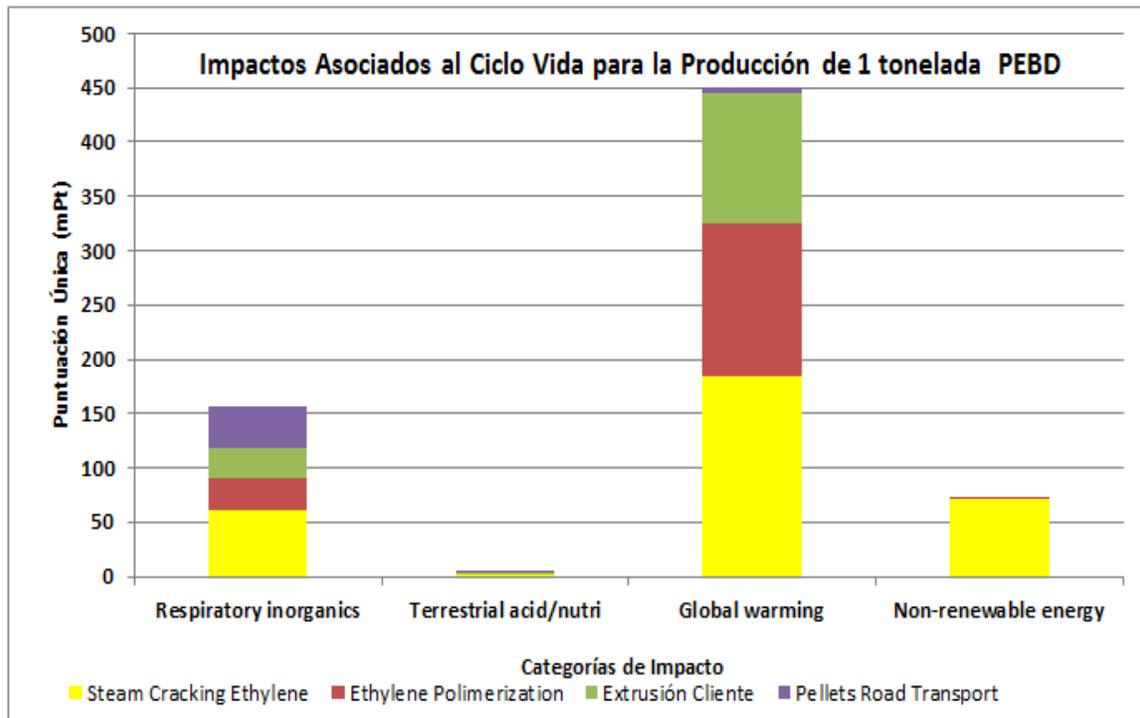
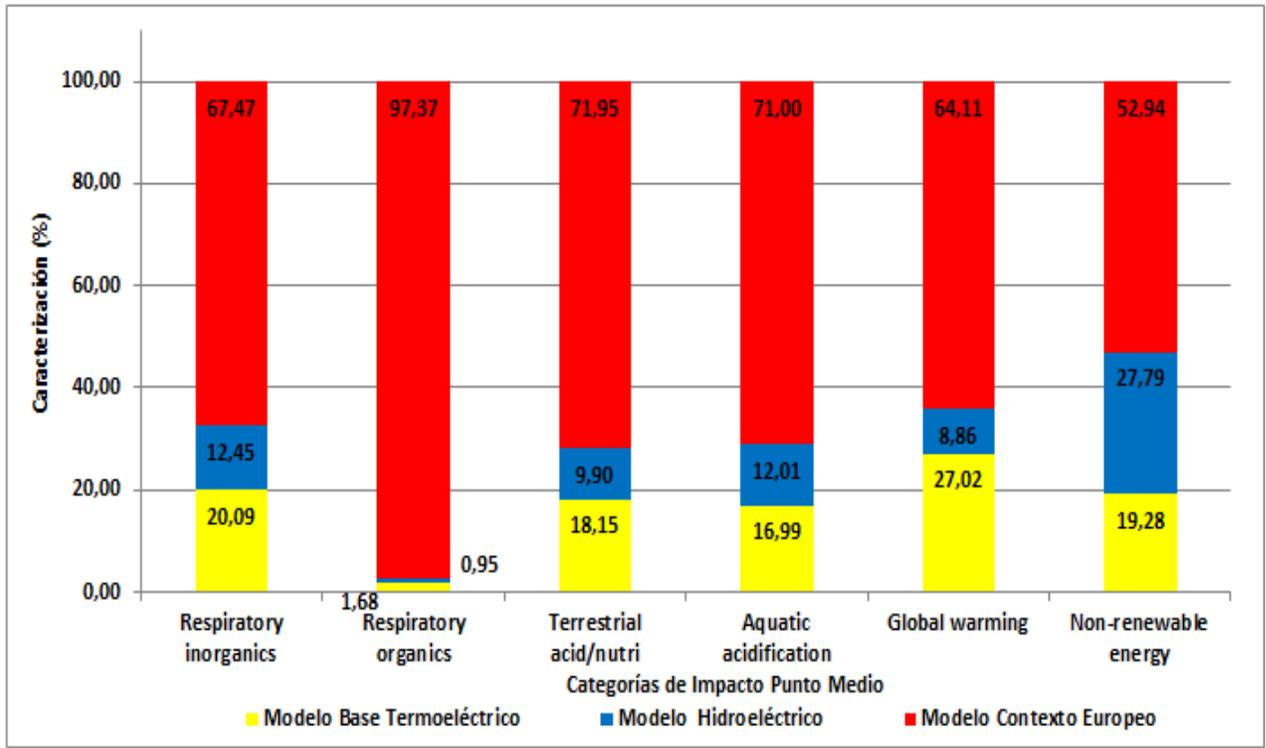


Figura 21. Ponderación de Impactos Globales, modelo línea base. (Autor)

## 5.2. ANÁLISIS COMPARATIVO

Como escenario de estudio, se presenta la comparación respecto a la caracterización de los Impactos Ambientales Potenciales, asociados para cada modelo de estudio (caso base, caso hipotético con energía matrix local y caso europeo) en la **Figura 22**. Todos los modelos están diseñados para la producción de 1 tonelada de Polietileno de Baja Densidad. Según el aporte a las categorías de impacto evaluadas, se logra apreciar que el modelo europeo tiene mayor impacto sobre las mismas, a razón del consumo de la energía mix de Europa, seguido del modelo de línea base y finalmente el modelo con menor contribución de impactos, fue el modelo hidroeléctrico.

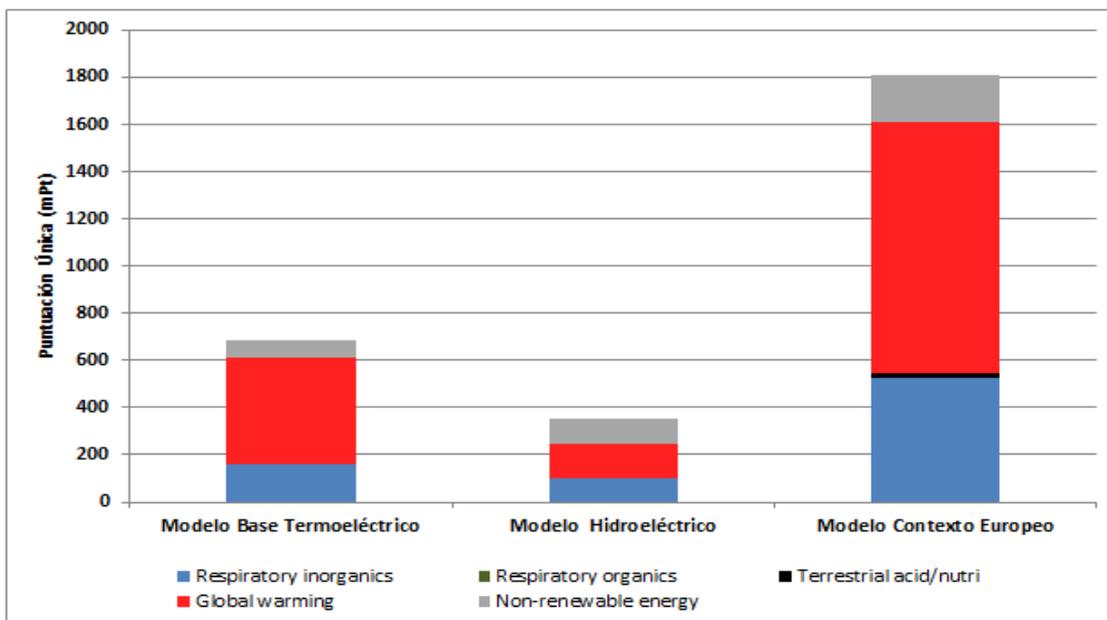
La explicación por la cual el modelo europeo aporta mayores impactos en la producción de PEBD, radica en la generación y consumo de la energía eléctrica, pues esta es asociada en una mezcla de energías (nuclear, térmica, eólica) que contribuyen a la emisión de más y diferentes contaminantes y se requiere de mayor consumo para el proceso de cracking de nafta y polietileno, en comparación al caso base.



**Figura 22. Caracterización de Impactos Ambientales Global, Comparación de Modelos. (Autor)**

En la **Figura 23** se presenta la ponderación de los impactos potenciales asociados a cada categoría de estudio. Como se logra observar, la mayor contribución está dada por el modelo Europeo (**1808 mPt**) hacia la categoría de calentamiento global (59% del impacto), seguido de los Inorgánicos respirados (29% del Impacto) y finalmente la contribución en la energía no renovable (11% del impacto). El siguiente modelo es el caso base, con una ponderación global de **682 mPt** distribuidos de forma que: afecta en un 65,9% la categoría de calentamiento global, posteriormente los Inorgánicos respirados en un 23% del impacto y por último un 10,6% del impacto total a la energía no renovable.

El modelo con menor contribución ambiental, es el caso que utiliza energía hidroeléctrica con un aporte global de **350 mPt**, distribuidos de manera que impacta en primera instancia el calentamiento global (42,1% del Impacto total), seguido de la energía no renovable en un 29,7% del impacto y finalmente una contribución del 27,7% del impacto a la categoría de Inorgánicos respirados. La contribución de las otras categorías de estudio, son ínfimas comparadas al impacto que atribuye en las más importantes.



**Figura 23. Ponderación de Impactos Globales, asociados a la producción PEBD, comparación de modelos. (Autor)**

### 5.3. ANÁLISIS ADICIONAL

En este literal se presenta la ponderación única de los impactos asociados, para la producción de polietileno de baja densidad (mPt), haciendo referencia exclusivamente a las categorías seleccionadas, puesto que no se considera un análisis exhaustivo.

#### 5.3.1. Evaluación de Impacto Potencial, escenario de Obtención de Etileno, modelo base.

En la **Figura 24** se presenta el árbol global del proceso de obtención de 1 tonelada de etileno a partir de corrientes gaseosas, proveniente de la refinación de crudo. Para la realización del proceso, se tuvo presente el ensamblaje de las unidades de compresión primaria y lavado caustico con una contribución de carga ambiental del 22,2% (referente al consumo de energía eléctrica y térmica, agua industrial y corrientes gaseosas), unidad de secado y enfriamiento con una contribución del 15,6% (alusivo al consumo energía térmica y corrientes gaseosas como materias primas), la unidad de fraccionamiento con una contribución del 16,7% (referente al consumo de servicios industriales) y finalmente la contribución ambiental aportada por el consumo global de energía eléctrica (38,8%) y las emisiones generadas en todo el proceso (6,7%).

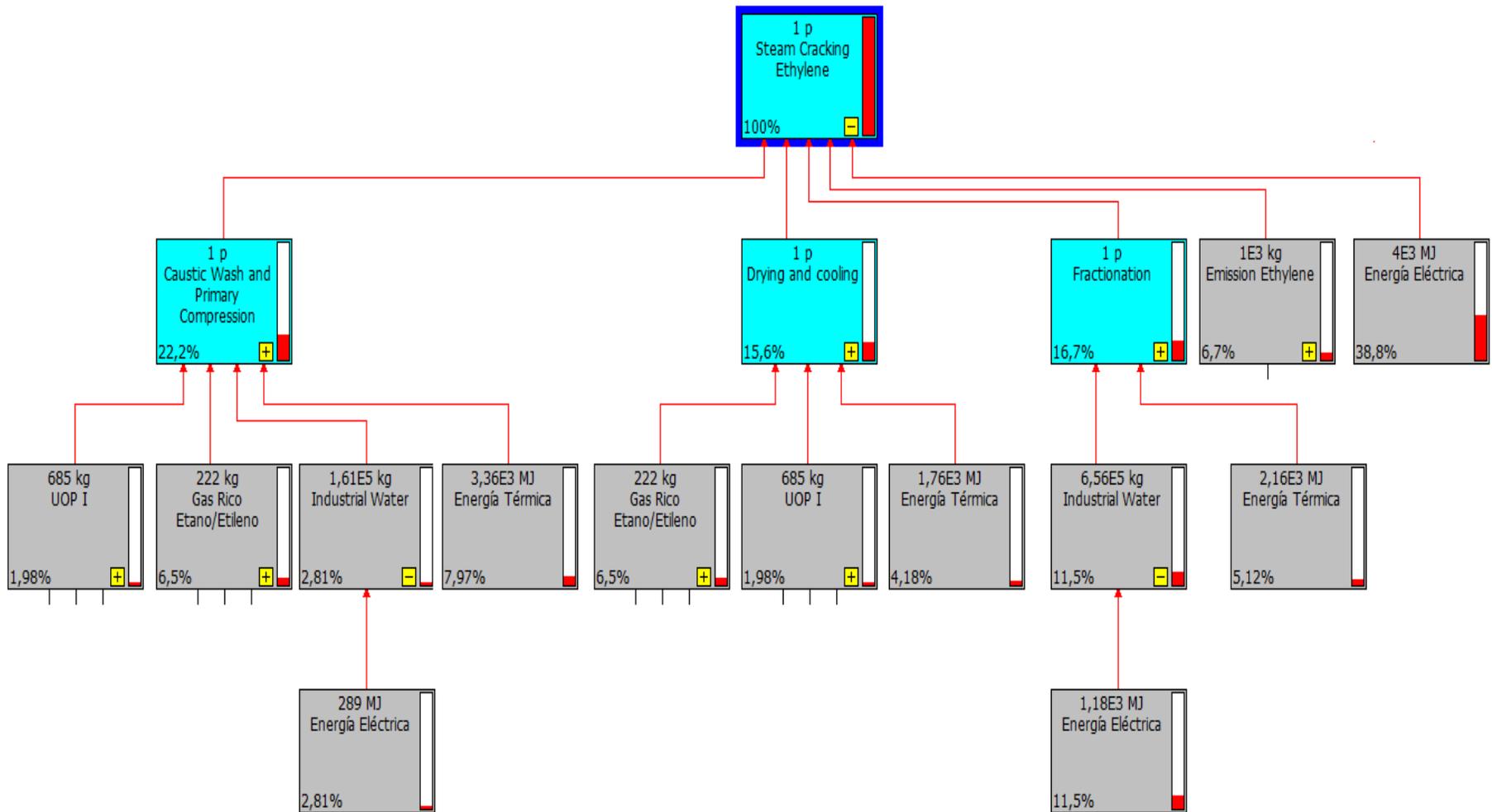


Figura 24. Árbol del proceso de Producción de Etileno (Corte de Visualización del 2,0 %). (Simapro 7.1).

En la **Tabla 23** se encuentran los Impactos potenciales, asociados por cada ensamblaje para la producción de etileno respecto a las categorías de impacto estudiadas. El valor de cada impacto, está dado en unidades mPt según la puntuación única del proceso. Según la ponderación de los impactos, se obtuvo (316,89 mPt) como contribución ambiental global del proceso. La mayor contribución de impactos obedece al consumo de energía eléctrica en la categoría de Calentamiento Global (183,78 mPt), seguido de la energía no renovable (71,62 mPt), ver **Tabla 24**. La única categoría que no se ve afectada en este proceso es la acidificación acuática.

**Tabla 23. Impactos Potenciales generados en la Producción de 1 tonelada de Etileno.**

Categoría de impacto	Unidad	Impactos Asociados por cada Ensamblaje (mPt)				
		Caustic Wash and Compression	Drying and cooling	Fractionation	Emission Ethylene	Energía Eléctrica
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	6,0608	2,3677	9,2322	21,0123	21,4950
Respiratory organics	kg C2H4 eq	0,0012	0,0005	0,0019	0,0000	0,0043
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	0,1705	0,0666	0,2598	0,2070	0,6049
Global warming	kg CO2 eq	28,4446	11,1119	43,3312	0,0001	100,8914
Non-renewable energy	MJ primary	35,8120	35,8120	0,0000	0,0000	0,0000

**Tabla 24. Contribución de Impactos por ensamblaje, en la Producción de 1 tonelada Etileno**

Unidad / Proceso	Contribución del Proceso (mPt)				
	Caustic Wash, Compression	Drying and cooling	Fractionation	Emission Ethylene	Energía Eléctrica
Energía Eléctrica	9,4277436	0,30759997	36,606574	-	122,99558
Energía Térmica	25,249456	13,2391	16,218423	-	-
Gas Rico Etano/Etileno	20,594498	20,594498	-	-	-
Emission Ethylene	-	-	-	21,219404	-
UOP I	6,2670887	6,2670887	-	-	-
Carga de Etano	5,0491071	5,0491071	-	-	-
UOP II	3,6895917	3,6895917	-	-	-
Polyethylene Recycle	0,21166412	0,21166412	-	-	-

En la **Figura 25** se grafican los resultados descritos con anterioridad. Es de enunciar, que este proceso no se tuvo en cuenta los Impactos Potenciales, asociados al consumo de materias primas (flujo de corrientes gaseosas), edificaciones, maquinarias, vías y transporte. En el ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se reporta el inventario e contribución global para el proceso.

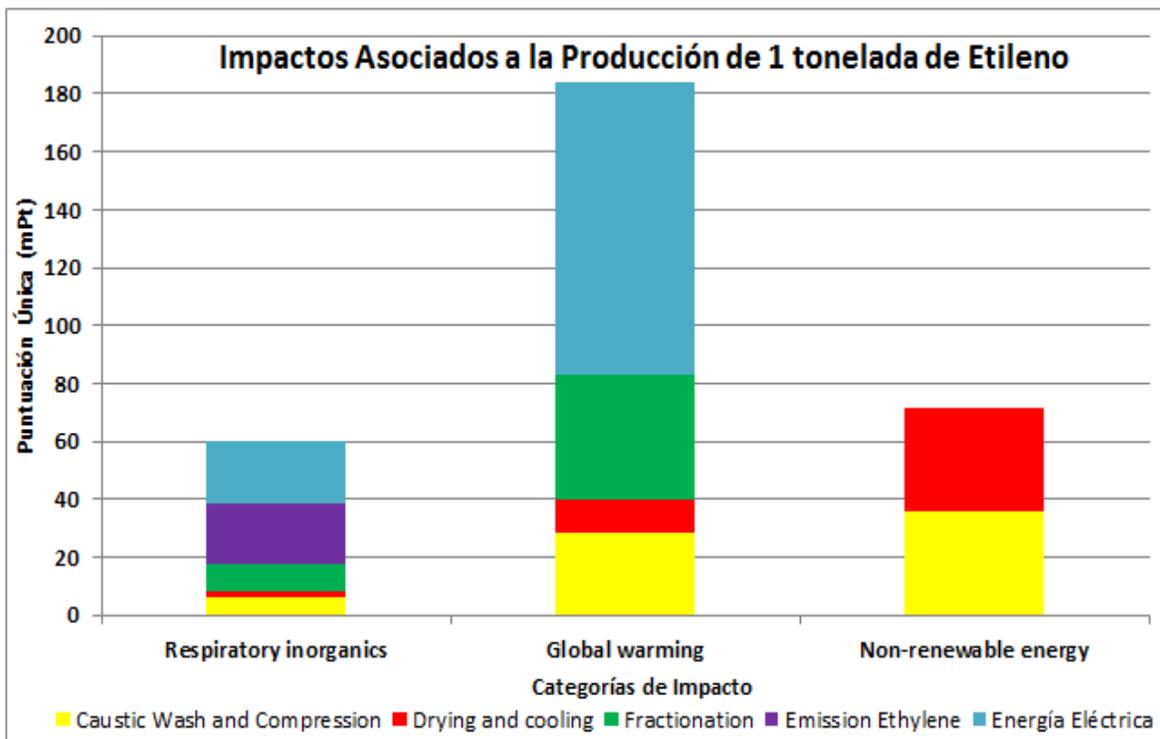


Figura 25. Impactos Globales asociados a la producción de Etileno, modelo base. (Autor)

### 5.3.2. Evaluación del Impacto Potencial, escenario de Producción de PEBD, modelo base.

Continuando con la evaluación de escenarios, en la **Figura 26** se presenta el árbol global del proceso de obtención de 1 tonelada de Polietileno de Baja Densidad “PEBD” a partir de etileno, proveniente del craqueo de etano. Para la realización del proceso, se tuvo presente el ensamblaje de las unidades de cargue y compresión primaria cuya contribución de carga ambiental fue del 1,57% (con relación al consumo de agua industrial y energía eléctrica); etapa de Compresión secundaria y reacción, con una contribución ambiental de 7,96 % (referente al consumo de energía eléctrica, térmica, agua industrial y ciclohexano), unidad de Extrusión y transporte neumático, con una contribución del 3,11% (alusivo al consumo energía eléctrica, agua industrial e iniciadores) y finalmente la contribución ambiental aportada por el consumo global de energía eléctrica 66,8% y térmica (vapor) de 20,6%.

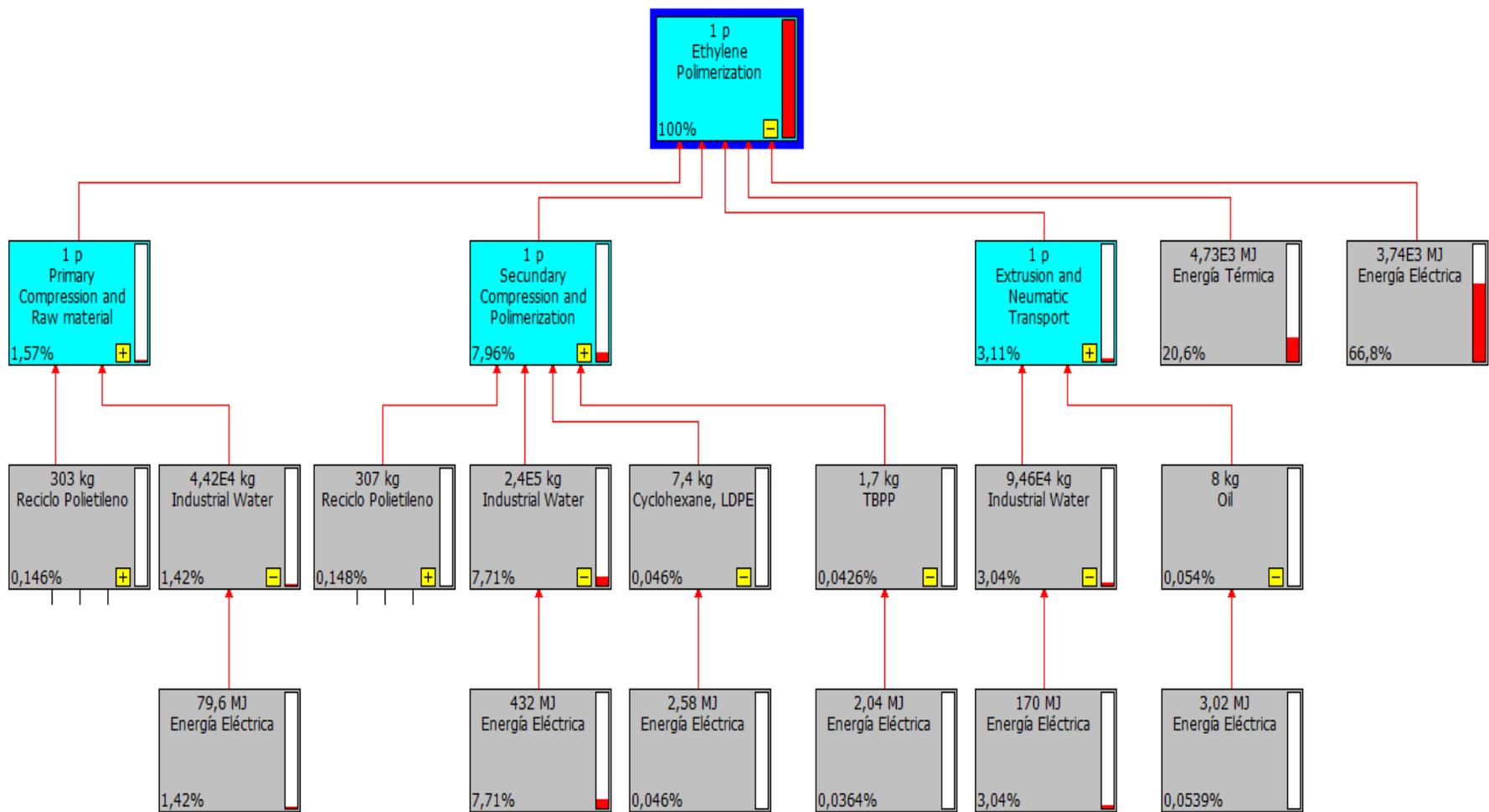


Figura 26. Árbol del proceso de Producción de PEHD (Corte de Visualización del 0,042 %). (Simapro 7.1).

En la **Tabla 25** se encuentran los impactos potenciales asociados por cada ensamblaje y utilizados en la producción de 1 tonelada de Polietileno de baja densidad, respecto a las categorías de impacto estudiadas. Según la ponderación de los impactos, se obtuvo (172,47 mPt) como contribución ambiental global del proceso. La mayor contribución de impactos al igual que el proceso de cracking de etano, obedece al consumo de energía eléctrica y térmica que impactan la categoría de Calentamiento Global (141,04 mPt) y de inorgánicos respirados (30,06 mPt), ver **Tabla 26**.

**Tabla 25. Impactos Potenciales generados en la Producción de 1 tonelada PEBD.**

Categoría de impacto	Unidad	Impactos Asociados por cada Ensamblaje (mPt)				
		Primary Compression	Secondary Compression	Extrusion and Neumatic Transport	Energía Térmica	Energía Eléctrica
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0,4287	2,3533	0,9492	6,2010	20,1309
Respiratory organics	kg C2H4 eq	0,0001	0,0006	0,0165	0,0013	0,0041
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	0,0121	0,0662	0,0262	0,1745	0,5665
Global warming	kg CO2 eq	2,0122	11,0598	4,3745	29,1013	94,4884
Non-renewable energy	MJ primary	0,25154	0,25486	0	0	0

**Tabla 26. Contribución de Impactos por ensamblaje, para la Producción de 1 tonelada PEBD.**

Unidad / Proceso	Contribución del Proceso (mPt)				
	Primary Compression	Secondary Compression	Extrusion and Neumatic Transport	Energía Térmica	Energía Eléctrica
Energía Eléctrica	2,45302	13,46595	5,33285	-	115,1898
Energía Térmica	-	-	-	35,477975	-
Reciclo Polietileno	0,25154	0,25486	-	-	-
Polyethylene, LDPE	-	-	0,03338	-	-
TBPP	-	0,01080	-	-	-
TBPA	-	0,00318	-	-	-
Oil	0,00001	0,00001	0,00013	-	-

En la **Figura 27** se grafican los resultados descritos con anterioridad; a diferencia que no se presentan las categorías con menor impacto. En este proceso no se tuvieron en cuenta los impactos asociados a los consumos de materias primas (iniciadores, aditivos, solventes), edificaciones, maquinarias, vías y transporte. En el **¡Error! No se encuentra el rigen de la referencia.** se reporta el inventario de contribución global para el proceso.

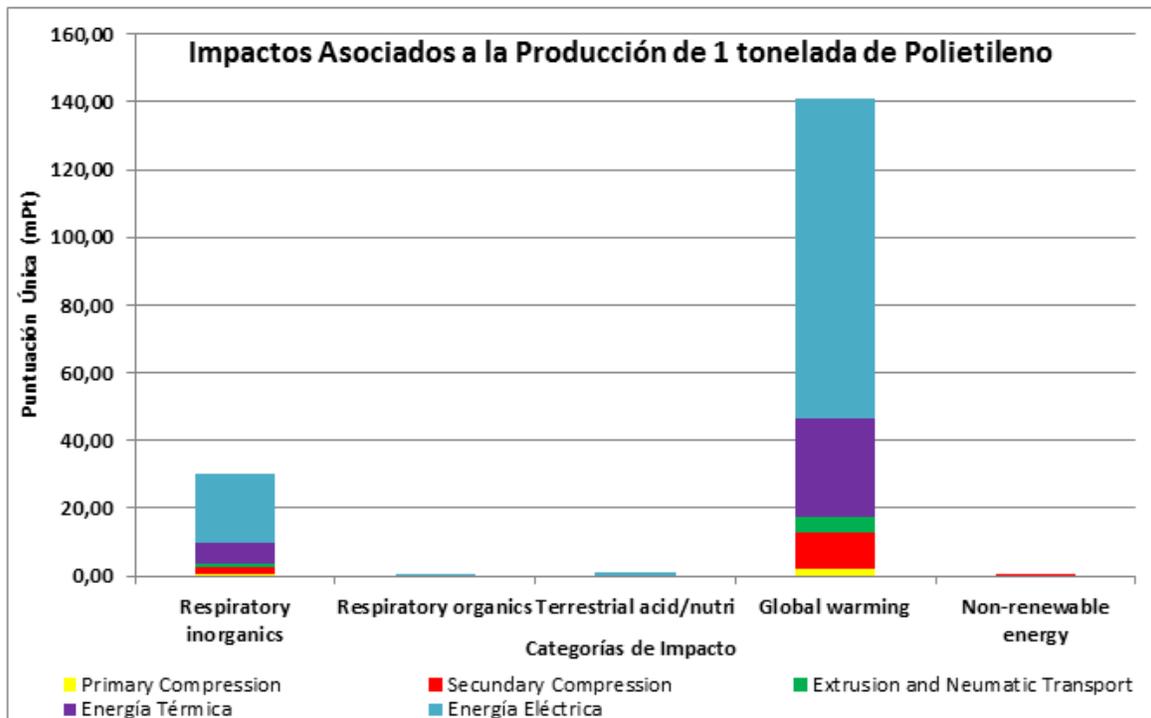


Figura 27. Impactos Globales asociados a la producción de PEBD. (Autor)

### 5.3.3. Evaluación de Impacto potencial, escenario de Transformación de Pellets (Extrusión), modelo base.

Al igual que los subprocesos anteriores, se analizó la contribución ambiental en el escenario de transformación de 1 tonelada de PEBD (pellets) en bolsa plástica (proceso de extrusión blown film). Según la ponderación de los impactos, se obtuvo (150,34 mPt) como contribución ambiental global del proceso. Los impactos potenciales están dados al consumo de energía eléctrica, agua y uso de aceite lubricante en la extrusión del pellets (ver **Tabla 27**) y por ende se generan las emisiones respectivas al proceso.

Tabla 27. Contribución Ambiental, por consumo de servicios en la transformación de PEBD.

Consumo	Unidad	Valor IP
Energía Eléctrica	mPt	147,58433
Agua de Enfriamiento	mPt	2,654158
Aceite lubricante	mPt	1,68E-09

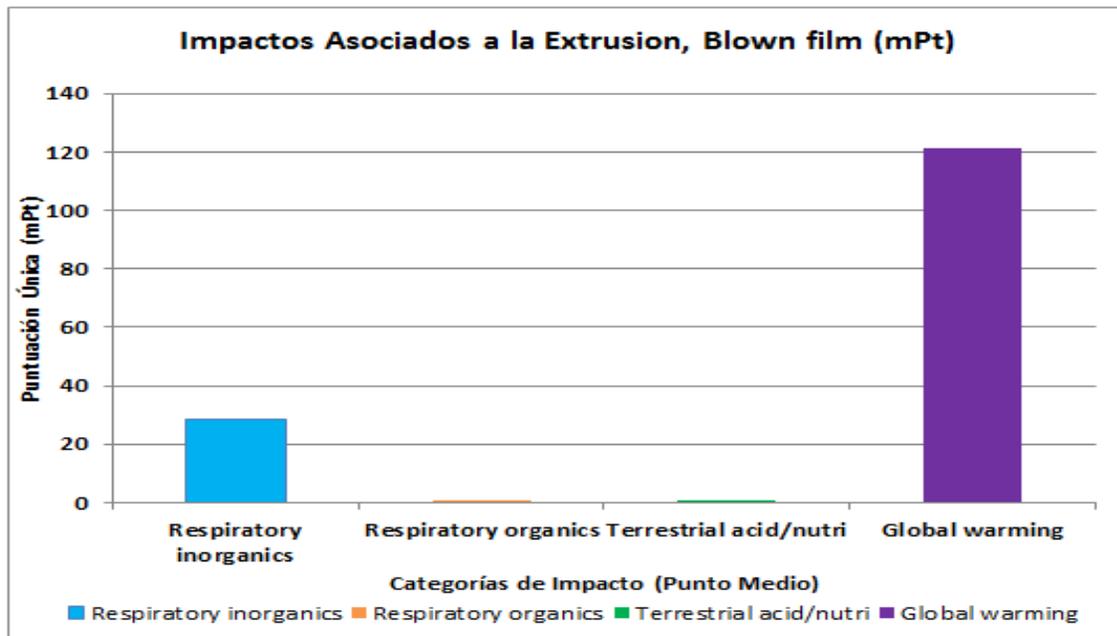
En la **Tabla 28** y **Figura 28**, se presentan los Impactos Ambientales asociados a cada categoría objeto de estudio. La mayor contribución se relaciona directamente al calentamiento global (121,06 mPt), debido al consumo de energía eléctrica, seguido del

Impacto Inorgánico respirado (28,45 mPt). Los valores de las otras categorías son menores y no influyen directamente el proceso.

**Tabla 28. Impactos Potenciales durante la transformación de PEBD en pellets.**

Categoría de impacto	Unidad	Extrusión, Blown film (mPt)
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	28,445227
Respiratory organics	kg C2H4 eq	0,006377144
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	7,26E-01
Global warming	kg CO2 eq	121,06

En el ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se reporta el inventario de ontribución global para este proceso.



**Figura 28. Impactos Potenciales asociados a la extrusión del PEBD. (Autor)**

## 5.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

### 5.4.1. Evaluación de Impacto Potencial, escenario de Transporte y Distribución de Pellets, modelo base.

En la **Tabla 29 y Tabla 30** se muestran los valores obtenidos de cada Impacto Potencial generados por el consumo y combustión de ACPM, durante el transporte de 1 tonelada

de PEBD en cuatro diferentes localidades. El valor de cada impacto, está dado en unidades mPt según la puntuación única del proceso. Según la ponderación de los impactos, se obtuvo (190,31 mPt) como contribución ambiental global del proceso. Se considera el mismo uso de combustible, la misma velocidad por recorrido (60 km/h).

**Tabla 29. Impactos Potenciales generados por consumo de ACPM**

Categoría de Impacto	Unidad	Impacto por Consumo de ACPM (mPt)			
		Barranquilla	Bogotá	Cali	Medellín
Respiratory Inorganics	kg PM2.5 eq	3,07E-01	3,60E-01	4,50E+00	2,85E-01
Terrestrial Acid/Nutri	kg SO2 eq	6,23E-03	7,33E-03	9,16E-03	5,80E-03
Global Warming	kg CO2 eq	3,07E+00	3,61E+00	4,52E+00	2,86E+00

**Tabla 30. Impactos Potenciales generados por la Combustión de ACPM**

Categoría de Impacto	Unidad	Impacto Combustión de ACPM (mPt)			
		Barranquilla	Bogotá	Cali	Medellín
Respiratory Inorganics	kg PM2.5 eq	4,99E+01	3,76E+01	5,62E+01	2,71E+01
Terrestrial Acid/Nutri	kg SO2 eq	1,01E+00	7,62E-01	1,14E+00	5,48E-01
Global Warming	kg CO2 eq	1,63E-01	1,23E-01	1,84E-01	8,84E-02

En la **Figura 29** se presenta el aporte global de los Impactos Ambientales Potenciales obtenidos durante el transporte de 1 tonelada de Polietileno. Según la ponderación, las categorías afectadas son inorgánicos respirados 172,28 mPt (mayor aporte por el consumo y combustión del ACPM), seguido del calentamiento global (14,6 mPt), de la Acidificación y Nutricación terrestre (3,49 mPt) y finalmente orgánicos respirados 3,92epx-08 mPt (consumo de agua). El mayor Impacto potencial, obedece al transporte hacia la localidad de Cali, debido a que la distancia a recorrer y el consumo de ACPM son mayores que en los otros destinos. En este caso particular, la contribución en cada categoría se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 31. Contribución global de IP durante el transporte de PEBD.**

Categoría de Impacto	Unidad	Ciudades de Destino (Transporte Polietileno mPt)			
		Barranquilla	Bogotá	Cali	Medellín
Respiratory Inorganics	kg PM2.5 eq	50,244	37,991	56,699	27,344
Respiratory Organics	kg C2H4 eq	9,79E-09	9,79E-09	9,79E-09	9,79E-09
Terrestrial Acid/Nutri	kg SO2 eq	1,018	0,770	1,149	0,554
Global Warming	kg CO2 eq	3,238	3,737	4,702	2,950

En este ensamblaje no se tuvo en cuenta los impactos potenciales generados en la construcción de las piezas del vehículo, su construcción y mantenimiento. Al igual que los impactos generados por la construcción y reparación de vías. Finalmente en el ¡Error! No

e encuentra el origen de la referencia. se reporta el inventario de contribución global para cada localidad.

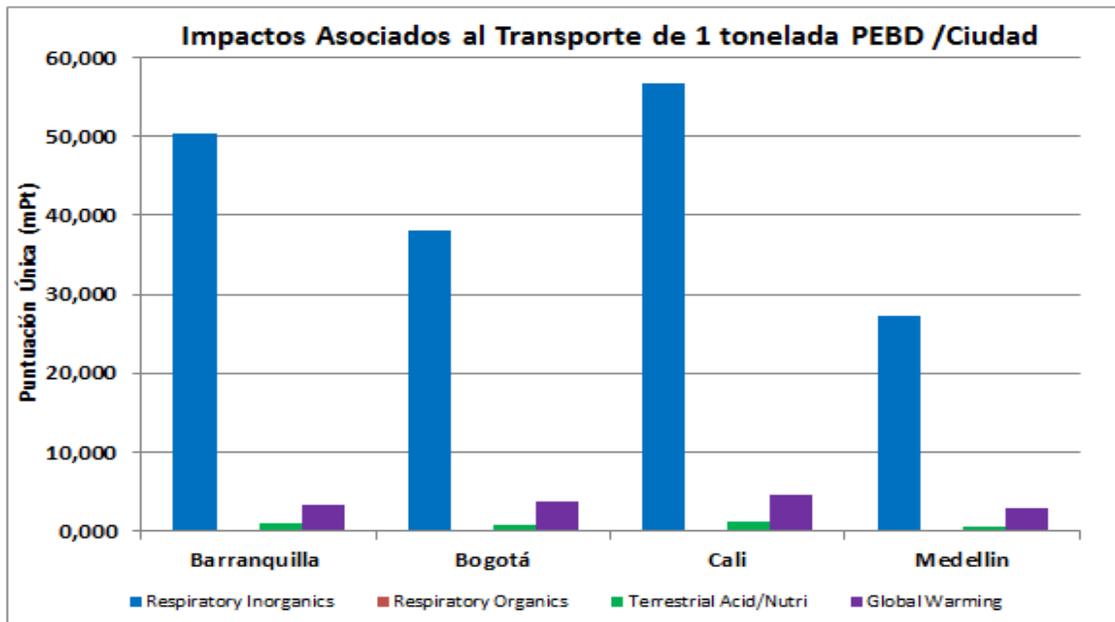


Figura 29. Comparación de IP del Transporte de pellets (ponderación, método Impact+2002)

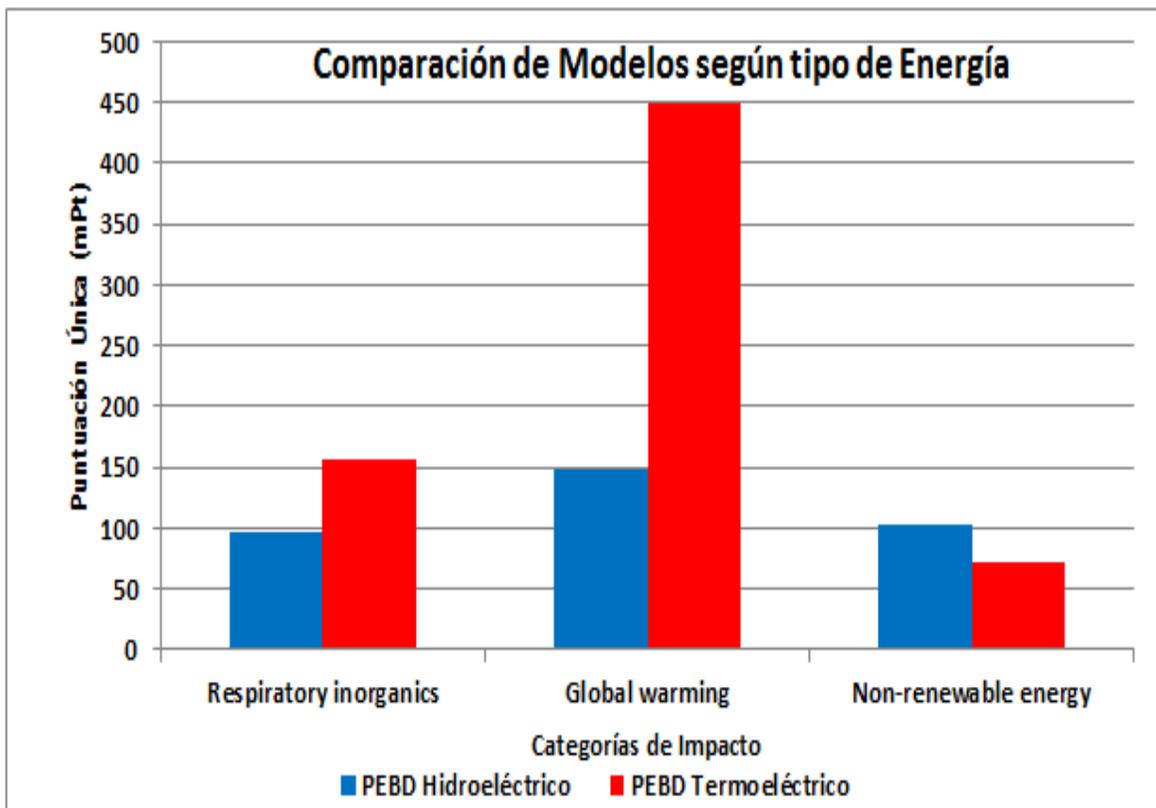
## 5.5. CONCEPTO SINTETIZADO

El último escenario es comparar los impactos ambientales asociados al proceso, según el tipo de energía eléctrica consumida (modelo base versus el modelo hipotético hidroeléctrica). El análisis de ciclo de vida comparativo, se limitó de puerta a puerta (cracking de 1 tonelada de etano, polimerización de 1 tonelada de etileno, transporte de 1 tonelada de polietileno en pellets en un tracto camión y la extrusión del pellets en película), diferenciando cada proceso por el consumo de energía eléctrica (ver inventarios en el ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). En la **Tabla 32** se presenta el perfil medioambiental de cada modelo, el cual reporta el impacto ambiental total originado por el proceso de polietileno de baja densidad base energía hidroeléctrica (**350,40 mPt**) comparado al proceso de polietileno de baja densidad base energía termoeléctrica (**682,10 mPt**).

Tabla 32. Impactos Potenciales asociados a la producción de PEBD, según el tipo de energía eléctrica.

Categoría de impacto	Unidad	PEBD Hidroeléctrico	PEBD Termoeléctrico
Respiratory inorganics	mPt	97,043294	156,66692
Respiratory organics	mPt	2,08E-02	3,68E-02
Terrestrial acid/nutri	mPt	1,992964	3,6498089
Global warming	mPt	147,4463	449,61351
Non-renewable energy	mPt	103,89437	72,130302
<b>Total</b>		<b>350,3977629</b>	<b>682,0974082</b>

Al igual que los escenarios anteriores, se evaluaron las categorías de mayor interés. El uso de la energía hidroeléctrica favorece el ACV del PEDB en un 48,63% de la carga ambiental total, comparado al uso de energía termoeléctrica. Para el caso de la energía hidroeléctrica, su mayor impacto asocia la categoría de calentamiento global en un 42,08% de la carga total, seguida de la energía no renovable con una contribución del 29,65% y finalmente un 27,70% de la carga en la categoría de inorgánicos respirados. Al comparar el proceso de PEBD termoeléctrico se determinó que su perfil medio ambiental afecta en mayor porcentaje la categoría de calentamiento global en un 65,92% de la carga global, posterior la categoría de inorgánicos respirados con un 22,97% y finalmente la categoría de energía no renovable en un 10,97%. En la **Figura 30** se visualiza la comparación entre los dos casos, en donde el proceso de PEBD termoeléctrico contribuye en mayor impactos, las categorías de calentamiento global (1,57 veces mayor) e inorgánicos respirados (0,83 veces mayor) en relación al otro proceso, que atribuye mayor impacto a la categoría de energía no renovable (2,8 veces mayor).



**Figura 30. Perfil Medioambiental para la Producción de 1 tonelada de PEBD, según el tipo de energía eléctrica. (Ponderación, método Impact+2002). (Autor)**

## 6. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el trabajo y de acuerdo con la información presentada, se pueden plantear las siguientes conclusiones:

- ❑ Con base en la información de literatura y datos de la industria, se realizó la comparación análisis del ciclo de vida (puerta a puerta) para tres modelos, desde el cracking de etano/nafta, la polimerización de etileno, el transporte y extrusión de 1 tonelada de PEBD. En la comparación y por medio de la ponderación única, se determinó que el modelo hidroeléctrico presento menor impacto ambiental, con una contribución global de 350 mPt; seguido del modelo línea base, con un aporte de 682 mPt y finalmente quién tuvo mayor contribución ambiental fue el modelo Europeo con 1808 mPt. Con lo anterior se válida que la energía eléctrica con menor contribución de impactos ambientales potenciales, es la energía hidroeléctrica, seguida de la energía termoeléctrica y por último la energía mix europea.
- ❑ Los contaminantes emitidos por las energías eléctricas, afectan directamente las categorías de calentamiento global entre un 40% y 65 % de la carga ambiental global (consumo de energía eléctrica y térmica, combustión de ACPM). Contribuye adicionalmente en un 23% al 27% de carga ambiental global, la categoría de Inorgánicos respirados (emisión de material particulado, etileno), como también la energía no renovable entre el 10% y 30% de la carga ambiental (consumo de materias primas no renovables: hidrocarburos). En la comparación se omitió el origen de obtención de la energía (tipo de energía suministrada).
- ❑ A través de la caracterización de impactos potenciales según la evaluación de las categorías, se logró determinar que de las seis categorías de punto medio, las que presentaron mayor contribución ambiental con relación a los procesos locales e internacionales fueron el calentamiento global, la energía no renovable y la acidificación y nutrificación terrestre. Las demás categorías asocian un menor impacto potencial. No se evaluaron los impactos asociados a las categorías de daño, debido a que no fue parte del alcance del estudio.
- ❑ Mediante la identificación y evaluación de los impactos potenciales ambientales asociados a la producción de 1 tonelada de PEBD, se logró determinar que la carga ambiental total (682,10 mPt) contribuida al ciclo de vida corresponde en un 46,5% al proceso de obtención de Etileno (mayor consumo de energía eléctrica y

térmica y materias primas), seguido del proceso de polimerización del etileno (25,3%), luego del proceso de extrusión de película soplada (22%) y finalmente la contribución del transporte del pellet a determinada localidad (6,23%).

- ❑ Según el perfil medioambiental evaluado para el ciclo de vida del modelo obtenido para la producción de polietileno de baja densidad, la mayor contribución de impactos obedece a la categoría de Calentamiento Global (449,61 mPt) por el consumo de energía eléctrica y térmica, seguida de los Inorgánicos respirados (156,67 mPt) por consumo de materias primas y luego de la energía no renovable (72,13 mPt) por el consumo de recursos no renovables.
- ❑ Con relación al proceso de extrusión de 1 tonelada de PEBD (pellets) en película soplada, se logra obtener una contribución ambiental de 150,34 mPt. La mayor contribución afecta directamente al calentamiento global (consumo de energía eléctrica), seguida de la categoría Inorgánico respirado (consumo de agua y uso de aceite lubricante en la extrusión del pellets).
- ❑ Respecto a la contribución de los Impactos Ambientales Potenciales, obtenidos durante la comparación del transporte de 1 tonelada de Polietileno, a cuatro localidades; permitió establecer que las categorías afectadas en la evaluación fueron: inorgánicos respirados (mayor aporte por el consumo y combustión del ACPM), seguido del calentamiento global, de la Acidificación y Nutricación terrestre y finalmente orgánicos respirados (consumo de agua). Los impactos potenciales están condicionados a la distancia a recorrer y al consumo de ACPM (a mayor distancia, mayor consumo energético y mayor impacto).
- ❑ Se concluye a nivel general que el modelo generado en el estudio (energía termoeléctrica) contribuye menor carga ambiental para la producción de polietileno de baja densidad en relación a modelos europeos con recursos no renovables. Al comparar el mismo proceso, pero con energía eléctrica local (hidroeléctrica), este asocia menor impacto, considerando que el modelo base debería utilizar energía hidroeléctrica no solo para áreas administrativas, sino principalmente en la intervención de procesos industriales.

## 7. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos se recomienda:

- ❑ El análisis de ciclo de vida para la producción de 1 tonelada de polietileno de baja densidad, de origen fósil, no tiene como objetivo establecer algún listado de mejoras en los procesos, para ello se debe realizar una fase posterior denominada Ecodiseño que permite plantear las posibles soluciones de mejora del estudio.
- ❑ La evaluación de impactos realizado, estableció que de las seis categorías de impacto, solo cinco fueron representativas: Calentamiento global, Energía no renovable, Inorgánicos Respirados, Orgánicos Respirados y la acidificación y nutrificación terrestre, solo las dos primeras presentan mayor impacto sobre los procesos acorde a la información recolectada. Estos impactos están asociados a las emisiones generadas por el consumo de energía eléctrica (termoeléctrica), para ello se deben disminuir el nivel de contaminantes en determinada producción.
- ❑ Se requiere actualizar la información de los procesos (inventarios) y la asignación de impactos en las etapas de extracción y refinación del crudo, como también los inventarios en relación a la obtención de materias primas (aditivos, iniciadores, catalizadores, etc.), uso y disposición final del producto (PEBD), para posteriormente realizar un estudio completo de ACV de la cuna a la tumba.
- ❑ El estudio solo tuvo en cuenta las emisiones generadas al aire, por consiguiente se deben realizar las mediciones con equipos especializados, para determinar los contaminantes presentes en vertimientos y en los residuos sólidos, generados en cada etapa de producción, según los límites y alcances definidos en el estudio.
- ❑ Se propone realizar la medición de la calidad de energía eléctrica utilizada en los equipos, con el fin de evaluar la eficiencia energética en los motores de la planta, que permitirá posteriormente identificar los equipos que requieren mantenimiento o caso tal sustitución de piezas o reemplazo del equipo.
- ❑ Garantizar el uso adecuado del retorno de condensados a los mismo procesos, con el fin de disminuir el consumo de agua y contrarrestar la generación de energía térmica (vapor), mediante el análisis de Integración energética para aquellas corrientes de proceso que requieran in intercambio significativo de energía, con la aplicación del software Aspen HX-Net® (estableciendo los servicios industriales con menor costo económico).
- ❑ Se debe evaluar y optimizar el funcionamiento en la operación de los equipos colectores de polvo (filtros de talegas), elutriador y puesta en marcha de los despelusadores (estado del equipo, caída de presión, velocidad de aire de entrada), que generan las emisiones de material particulado en la unidad de polimerización de etileno.

## REFERENCIAS

**Akiyama M., Tsuge, T., Doi, Y.** Environmental life cycle comparison of polyhydroxyalkanoates produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation. Polym Degrad [Journal]. - [s.l.] : Stabil 80, 2003.

**Bernard Folie** Phase Equilibria in High pressure Polyethylene Technology [Journal]. - Canada : Exxon Chemical International, 1996. - p. 1501.

**Boustead I.** Eco-profiles of the European Plastics Industry. Asociación de Manufactura de Plásticos de Europa. Low Density Polyethylene (LDPE) [Report]. - Brussels, Belgium : www.plasticseurope.org., 2005.

**Boustead I.** Environmental Product Declarations of the European Plastics Industry. Asociación de Manufactura de Plásticos de Europa. Low Density Polyethylene (LDPE) [Journal]. - Brussels, Belgium : www.plasticseurope.org., 2008.

**CEMPRE** Situación actual de Colombia en el reciclado de polímeros.- Compromiso Empresarial para el reciclaje de Colombia [Book Section]. - 2011.

**Chiller Tonnage Design Parameters for the Plastics Industry.** <http://www.chillers.com/TonnageParameters.htm> [Online].

**Christin Liptow Tillman and Anne Marie** A comparative Life Cycle Assessment Study of Polyethylene Base don Sugarcane and Crude Oil [Journal]. - Göteborg, Sweden. : Chalmers University of Technology, Environmental Systems Analysis,, 2012. - SE-412 96.

**Christin Liptow Tillman and Anne Marie** Life cycle assessment of renewable based hydrocarbon plastics [Book]. - Göteborg, Sweden. : Chalmers University of Technology, Environmental Systems Analysis,, 2009.

**Consoli F., Allen, D., Boustead, I., Fava, J., Franklin, W., Jensen, A.A., de Oude, N, Parrish, R. Perriman, R., Postlethwaite.** Guidelines for lfe cycle assessment. A code of practice. [Report]. - Pensacola, Fl. : SETAC Press, 1993.

**Donald L. Burdick and William L. Leffler** Thermoplastics [Book Section] // Petrochemicals in Nontechical / book auth. Leffler Donald L. Burdick and William L.. - Tulsa, Oklahoma : Penn Well Corporation, 2001. - Third Edition.

**Dr. Arnold Tukker TNO Institute of Strategy, Technology and Policy** Handbook on Life Cycle Assessment [Book]. - New York, Boston, Dordrecht, London and Moscow : [s.n.], 2002. - Vol. 7 : p. 687.

**Dr. Martin Patel Dr. Catia Bastioli, Dr. Luigi Marini.** Environmental assessment of bio-based polymers and natural fibres [Journal]. - Holanda : University Of Utrecht, 2005.

**Ekvall T. Tillman A.-M, Molander, S.** Normative ethivs and methodology for life cycle assessment [Journal]. - 2005. - pp. 13-14.

**Focus on Energy** PLASTICS INDUSTRY ENERGY BEST PRACTICE GUIDEBOOK [Report]. - USA : [s.n.], July 2006.

**Göran. Finnveden Michael z. Hauschild, Tomas Ekvall, Jeroen Guinée, Reinout Heijungs, Stefanie Hellweg, Annette Koehler, Daviud Pennington and Sangwon Sun.** Recent developments in Life Cycle Assessment [Journal] // Journal of Enrionmental Management. - Stockholm, Sweden : [s.n.], Mayo 22, 2009. - 0301-4797. - pp. 1-21.

**GRB Vicepresidencia de Refinación y Petroquímica.** Manual de descripción de procesos de la Unidad de Polietileno. - Barrancabermeja : [s.n.], 2010.

**Guo M.** Lifee Cycle Assessment (LCA) of Light weight Eco - composites. Starch - Based Foam. [Journal]. - Verlag Berlin Heidelberg : Springer Theses, 2012. - DOI: 10.1007/978-3-642-35037-5.4.

**Hilkka Knuuttila and Pakarinen Arja Lehtinen and Auli Nummila** Advanced Polyethylene Technologies— Controlled Material Properties [Journal]. - Poryoo, Finland : Ady Polym Sci, 2004. - 169. - pp. 13-27.

**IHS** <http://www.ihs.com/products/chemical/planning/ceh/low-density-polyethylene.aspx> [Online]. - Mayo 2012. - Diciembre 20, 2013.

**ISO 14040 International Standard Organization** Environmental Management – Life cycle assessment – Principles and framework. [Patent]. - 2006.

**ISO 14041 International Standard Organization** Environmental Management – Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis. [Patent]. - 1998.

**ISO 14042 International Standard Organization** Environmental Management – Life cycle assessment – Life cycle impact assessment. International Standard Organization. [Patent]. - 2006.

**ISO 14044 International Standard Organization** Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. [Patent]. - Geneva, Switzerland, 2006.

**K.G. Harding J.S. Dennis, H. von Blottnitz, S.T.L. Harrison.** Environmental analysis of plastic production processes: Comparing petroleum-based polypropylene and polyethylene with biologically-based poly- $\gamma$ -hydroxybutyric acid using life cycle analysis [Journal]. - Universidad de Cape Town, Sur Africa.: Journal of Biotechnology - Elsevier- Science Direct, 2007. - 10.1016/j.jbiotec.2007.02.012.

**Liptow Christin and Anne - Marie Tillman** Evaluación del ciclo de vida comparativo de polietileno basado en la caña de azúcar y el petróleo crudo [Book]. - Göteborg, Sweden : Chalmers University of Technology, 2009.

**Marek Lyle F. Albright and James C.** Mechanistic Model for Formation of Coke in Pyrolysis Units Producing Ethylene [Journal] // School of Chemical Engineering, Purdue University. American Chemical Society. - 1988.

**Marini L., and C. Georgaki's** Low Density Polyethylene Vessel Reactors [Journal]. - [s.l.] : AIChEJ, 1984. - 30 : Vol. Steady State And Dynamic Modelling.

**Merchant Research & Consulting Ltda** Producción de Polietileno de baja densidad (LDPE): 2013 Perspectiva Mundial del mercado y pronóstico hasta el 2018 [Report]. - UK. : [s.n.], 2013.

**Merchant Research and Consulting Ltd** MCGROUP [Online]. - Julio 05, 2013. - Diciembre 20, 2013. - <http://mcgroup.co.uk/news/20130705/global-ldpe-production-grew-700000-tonnes.html>.

**Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment** Eco-Indicator 99, Manual for Designer [Book Section]. - España : [s.n.], 2000.

**Peacock. Andrew J.** Handbook of Polyethylene " structures, properties and applications". Company Exxon Chemical [Book]. - Baytown, Texas : Marcel Dekker, Inc., 2000.

**Piet D. Iedema Michael Wulkow and Huub C.J. Hoefsloot** Modeling Molecular Weight and Degree of Branching Distribution of Low Density Polyethylene [Journal]. - The Netherlands : Macromolecules 200, 2000. - Vol. 33. - pp. 7173-7184.

**Rheynell Luis Alberto Aranda** Cálculo de la huella de carbono del año 2009 correspondiente a las actividades administrativas y de transporte de proactiva aguas de Montería S.A. E.S.P [Report]. - Cali, Colombia : Universidad Santiago de Cali, 2011.

**Rizo Salvador Capuz and Navarro Tomas Gómez** Ingeniería del Ciclo de Vida para el Desarrollo de Productos Sostenibles [Book Section]. - Mexico D.F. : Alfaomega, Universidad Politecnica de Valencia, 2004. - Vol. I.

**Rodrigo Nuñez B. Fiorella Ortega A.** Estructura química de los radicales libres [Book]. - Lima, Perú : [s.n.], 2007.

**Ruban Anna** Life Cycle Assessment of Plastic Bag Production. [Journal]. - Uppsala, Suecia : Uppsala University, 2012.

**Schuster Charles E.** Exxonmobil High Pressure process technology for LDPE [Book Section] // Handbook of Petrochemicals Production Processes / book auth. Robert A. Meyers Ph.D.. - New York, Chicago : McGraw-Hill, 2005.

**Scientific Applications International Corporation (SAIC)** Life Cycle Assessment: Principles and Practice. By Mary Ann Curran [Book]. - Cincinnati, Ohio : National Risk Management Research Laboratory, 2006. - Vols. EPA/600/R-06/060.

**Sierra Juan and B. July Carolina Viva** Caso de Negocio de nuevos productos y aplicaciones a partir de LDPE [Report]. - Piedecuesta, Santander : Instituto Colombiano del Petróleo, 2012.

**Simon X Zhang et al Ray, Nolan Read and W. Harmon** Runaway Phenomena in Low Density Polyethylene Autoclave reactors. [Journal]. - Madison : Dept of Chemical Engineering, University of Wisconsin, 1996. - WI 53706.

**Sistema de Información Ambiental Minero Energético** <http://www.siame.gov.co/> [Online]. - SIAME. - Diciembre 7, 2014.

**Southwest Clean Air Energy.** Technical support document: Air discharge permit SWCAA 13-3052 Iso Polyfilms Inc. [Report]. - April 16, 2013.

**Temperature corporation. Load Sizing Chillers. (s.f.)**  
<http://www.temperaturecorporation.com/loadsizing.htm>. [Online].

**THERMAL TECH EQUIPMENTCo. Inc. Engineering Formulas . (s.f.)**  
<http://www.ttequip.com/knowledgelibrary/knowledgelibraryengineeringformulas.htm> [Online].

**Valentina Siracusa Carlo Ingraio, Agata Lo Giudice, Charles Mbohwa, Marco Dalla Rosa** Environmental assessment of a multilayer polymer bag for food packaging and preservation: An LCA approach [Journal]. - Italy : ELSEVIER - Food Research International 32, 2014. - Doria 6, 95125 Catania.

**Vasile Cornelia Pascu Mihaela** Practical Guide to Polyethylene [Book]. - Shawbury, Shrewsbury : Rapra Technology Limited, 2005.

## ANEXOS

### Anexo A. Glosario

**Asignación:** Fase del ACV en lo cual se determina, como se distribuyen los flujos de entrada o salida de una unidad de proceso, en el interior del sistema de producción al estudio.

**Cambio Climático:** Se llama cambio climático a la modificación del clima con respecto al historial climático en una escala global o regional. Tales cambios se producen en muy diversas escalas de tiempo y sobre todos para los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc. En teoría, son debidos tanto a causas naturales como antropogénicas.

**Categoría de Impacto:** Grupo representativo de impactos potenciales al medio ambiente, a los cuales se asignan los resultados del inventario del ciclo de vida.

**Declaración Ambiental de Producto, EPD:** Método estandarizado (ISO 14025) para comunicar el rendimiento con el medio ambiente, de un producto o servicio basado en datos de ACV.

**Dióxido de Carbono - CO<sub>2</sub>:** El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es un gas incoloro, denso y poco reactivo. Forma parte de la composición de la tropósfera (capa de la atmósfera más próxima a la Tierra) actualmente en una proporción de 380 ppm. Su ciclo en la naturaleza está vinculado al del oxígeno.

**Eco Indicador:** Los valores estándar de los eco-indicadores se pueden considerar como cifra sin dimensión, como base se utiliza el "Eco Punto Pt". En las listas de eco indicadores se utiliza la unidad de milipuntos (mPt), es decir: 700mPt=0,7Pt. El valor absoluto de los puntos no es demasiado relevante ya que el objetivo principal es el de comparar las diferencias relativas entre productos o componentes. La escala se elige de tal forma que el valor de un Pt represente una centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano Europeo, cuyo valor se ha establecido, dividiendo la carga total en Europa entre el número de habitantes y multiplicado por 100 (factor de escala).

**Emisión:** Descarga de elementos químicos o físicos (sustancias, calor, ruido, etc.) de un sistema de producción al medio ambiente.

**Emisión de Gases Efecto Invernadero:** Masa total de un GEI liberado a la atmósfera en un determinado período de tiempo.

**Evaluación del ciclo de vida, LCA:** Una gestión normalizada herramienta (ISO 14040-44) para evaluar y cuantificar el total de impacto ambiental de los productos o actividades a lo largo de su en- ciclo de vida del neumático de determinados materiales, procesos, productos, tecnologías, servicios o actividades.

**Factor de Caracterización:** Factor derivado de un modelo que se aplica para convertir los resultados asignados de un ICV en unidades equivalentes de una sustancia con potencial capacidad de promover el impacto al medio ambiente.

**Factor de Emisión de Gases Efecto Invernadero:** Factor que relaciona los datos de la actividad con las emisiones de GEI.

**Fuente de Emisión de GEI:** Unidad o proceso físico que libera un Gas Efecto Invernadero hacia la atmósfera.

**Flujo Elemental:** Materia o energía introducido en el sistema, sometido a estudio, que ha sido sacado del medio ambiente sin la previa transformación humana o material o energía salido del sistema, sometido a estudio, que ha sido desechado en el medio ambiente sin una subsiguiente transformación.

**Gas Efecto Invernadero – GEI:** Componente gaseoso de la atmósfera, tanto natural como antropogénico, que absorbe y emite radiación a longitudes de onda específicas dentro del espectro de radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Algunos de los GEI son: Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), Hidrofluorocarbonados (HFC), Perfluorocarbonados (PFC) y Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>).

**Impacto Medioambiental:** Consecuencia atribuida al flujo de entrada o salida de un sistema de producción al medio ambiente.

**Indicador de Impacto:** Atributo o aspecto natural del medio ambiente, salud humana o recursos, que se identifica como una preocupación o problema ambiental.

**Indicador Medioambiental:** Parámetro representativo del daño de un producto al medio ambiente, obtenido por el análisis de ciclo de vida.

**Límites del Sistema:** Interfaces entre un sistema de producción y el medio ambiente u otros sistemas de producción.

**Metano - CH<sub>4</sub>:** El metano es el hidrocarburo alcano más sencillo, cuya fórmula química es CH<sub>4</sub>. Cada uno de los átomos de hidrógeno está unido al carbono por medio de un enlace

covalente. Es una sustancia no polar que se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias. Es incoloro e inodoro y apenas soluble en agua en su fase líquida. En la naturaleza se produce como producto final de la putrefacción anaeróbica de las plantas. Este proceso natural se puede aprovechar para producir biogás. Muchos microorganismos anaeróbicos lo generan utilizando el  $\text{CO}_2$  como aceptor final de electrones.

**Óxido Nitroso -  $\text{N}_2\text{O}$ :** El óxido de nitrógeno (I), óxido de dinitrógeno, protóxido de nitrógeno, anhídrido nitroso, óxido nitroso, gas hilarante, o también gas de la risa ( $\text{N}_2\text{O}$ ) es un gas incoloro con un olor dulce y ligeramente tóxico. Provoca alucinaciones, un estado eufórico y en algunos casos puede provocar pérdida de parte de la memoria humana. No es inflamable ni explosivo, pero soporta la combustión tan activamente como el oxígeno cuando está presente en concentraciones apropiadas con anestésicos o material inflamable.

**Recursos Renovables:** Los materiales elaborados con materias primas y energías renovables o muy abundantes, son preferibles ante, que otros que utilizan fuentes convencionales o escasas (combustibles fósiles, minerales escasos, etc.) debido al carácter preservante y al efecto o biodegradabilidad de sus fuentes.

**Reglas de categoría de producto, PCR:** Un conjunto de reglas para la preparación de ACV y DAP dentro de una clase funcionalmente definido de productos. Un documento de la PCR es un componente necesario de cualquier Tipo III Programa de la Declaración Ambiental (ISO 14025).

**Unidad Funcional:** Especificación física o funcional de un producto o sistema productivo para su uso como unidad de referencia en un estudio de análisis del ciclo de vida.

**Unidad del Proceso:** La porción más pequeña de un sistema de análisis que reúne los datos necesarios para realizar el análisis del ciclo de vida.

## Anexo B. Descripción de Procesos Industriales para Obtener Etileno

La Unidad de Etileno II, tiene capacidad para producir 100 ktonelada/año de etileno. En los hornos de Pirolisis se craquea el etano de carga, para generar etileno y una serie de productos los cuales varían desde hidrógeno hasta gasolina.

**Tabla 33. Flujos y Condiciones de Operación de las corrientes de la Unidad de Etileno**

Corriente	Flujo Másico (tonelada/h)	Temperatura (°F)	Presión (psig)
1	1,4229	103,00	5,00
2	1,8368	81,34	13,00
3	3,4819	100,00	4,60
4	3,4819	209,67	27,00
5	3,4819	97,27	22,00
6	3,4819	230,56	76,00
7	3,4819	101,06	71,00
8	3,4819	185,05	137,00
9	4,2823	99,36	132,00
10	4,2823	183,79	242,00
11	3,3855	115,00	230,00
12	3,3855	115,00	228,00
13	0,1784	100,00	494,50
14	3,5639	230,00	210,50
15	3,5639	500,00	210,50
16	3,5639	101,56	207,00
17	3,3855	234,32	497,00
18	3,3855	56,00	489,50
19	3,3729	56,00	488,50
20	2,9416	-5,96	472,50
21	1,3369	-40,23	473,00
22	0,7365	-103,07	469,50
23	0,9548	-186,59	75,10
24	0,9230	-215,71	195,50
25	0,2222	-229,96	10,10
26	2,9149	34,16	452,00
27	2,9149	8,41	315,00
28	2,8620	5,09	289,00
29	1,0010	-23,03	265,00
30	0,2189	-23,03	265,00
31	1,6421	17,90	275,10
32	0,0529	109,95	161,00
33	0,0514	90,55	132,00
34	0,0015	326,67	135,80
35	0,0126	56,00	
36	0,8004		
37	0,6847		
38	0,2553		

**Horno de Pirolisis:** Conversión de Etano hacia Etileno mediante pirolisis a 1533 °F (actual 1490-1515 °F) en tres hornos, un cuarto horno para la decoquización.

**Torre Quench:** Enfriar gas craqueado rápidamente desde 1533 °F hasta 600 °F a través del intercambiador E4100, produciendo vapor HP, y luego hasta 100 °F en la torre T4100 mediante agua en contracorriente con el fin de detener la reacciones y formación de subproductos.

**Sistema de Compresión primaria:** Comprimir el gas craqueado desde 5 psig (219°F) hasta 233 psig (187°F) en cuatro etapas en el compresor centrífugo C4100. Preparar la carga para la separación de las diferentes corrientes en la zona de enfriamiento y fraccionamiento.

**Lavado Caustico y Conversión:** Eliminar y/o neutralizar los gases ácidos del gas craqueado ( $H_2S$ ,  $CO_2$ ) en una torre de lavado cáustico, T02-AB, con una solución diluida de soda caustica (NaOH), máximo de 1 ppm  $H_2S$  (inhibe el catalizador de los reactores R01-ABC). A la salida del tambor el gas de pirólisis tiene una presión de 225 psig y continúa su trayectoria al Filtro de Alúmina F-02, donde se retienen partículas de soda que no se alcanzaron a separar, con el objetivo de proteger la operación en los convertidores por el arrastre de gotas de soda.

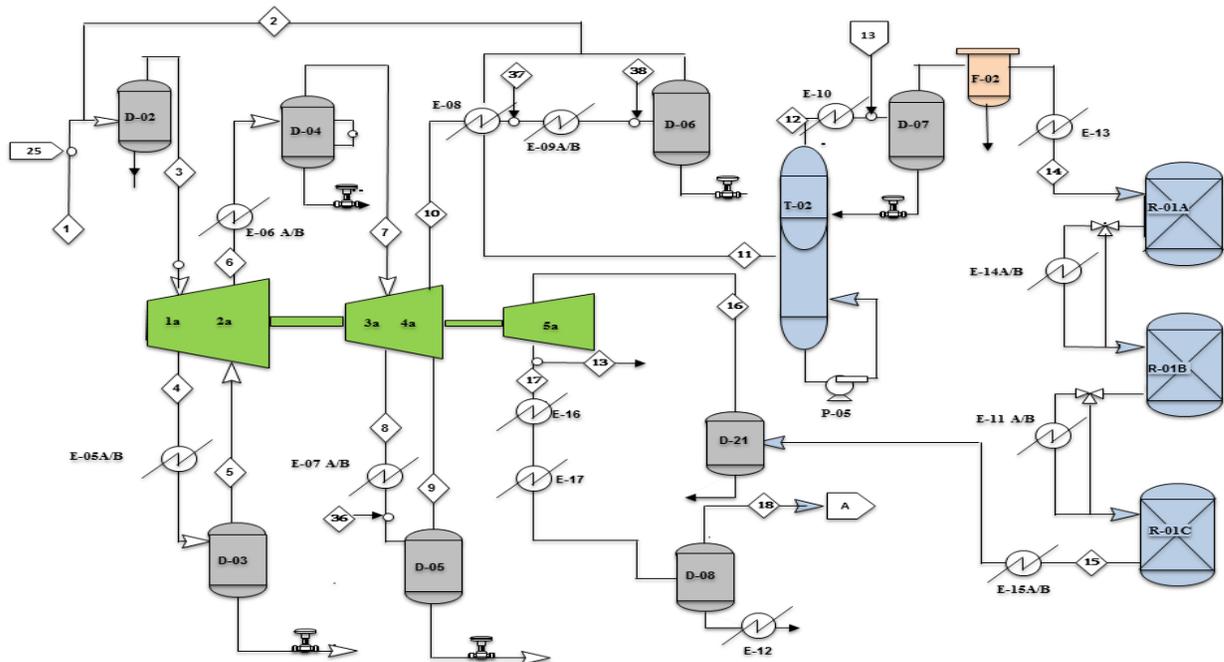


Figura 31. Sistema Compresión primaria, lavado caustico y reacción, Unidad Etileno. (Autor)

**Sistema de Reacción:** El gas continúa a la etapa de conversión, donde los acetilenos y dienos se convierten a etileno, ya que el etileno producto debe contener dichos componentes en una concentración de ppm como requisito para carga a las unidades de Polietileno. Debido a que la reacción es exotérmica es necesario disminuir la temperatura a la salida de cada reactor. La conversión de acetileno en etileno se da por hidrogenación

selectiva en los reactores R01-ABC en serie (catalizador ICI 308-1) especificación máxima de 2 ppm a la salida del 3er reactor.

**Compresión Secundaria y Secado:** El gas proveniente de la etapa de reacción, a una presión de 207 psig y temperatura de 100 °F es succionado por la quinta etapa del Compresor y descargado a una presión de 497 psig y a una temperatura de 237 °F, luego se enfría con agua y se divide en dos corrientes, una corriente se utiliza como reciclo de la quinta etapa del compresor y se envía a la entrada del deparador D-07, la otra corriente continúa su trayectoria hacia el E-17 donde se enfría a 55 °F al transferirle calor a una corriente de propileno para luego entrar al tambor separador D-08. El líquido acumulado en el fondo del tambor se envía al E-75 para calentarse a 100 °F y luego ser enviado al D-21. El gas saliente de la cima del D-08 a 491 psig entra al Secador de Gas de Pirolysis AD-41A/B para retirar humedad y evitar taponamiento por formación de hielo en la sección de enfriamiento. La caída de presión del gas de pirolisis a través de los secadores es de 3 psi, el gas sale por el fondo del secador con aproximadamente 1% de humedad, entra al Filtro F-01.

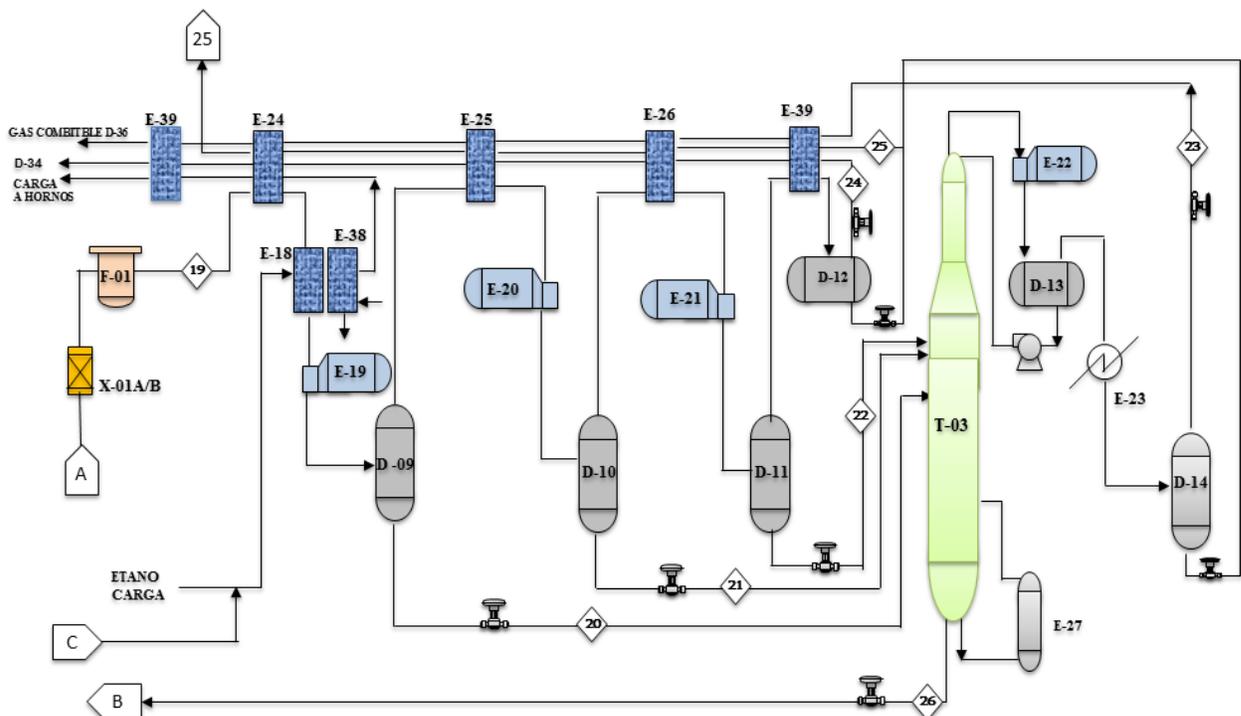
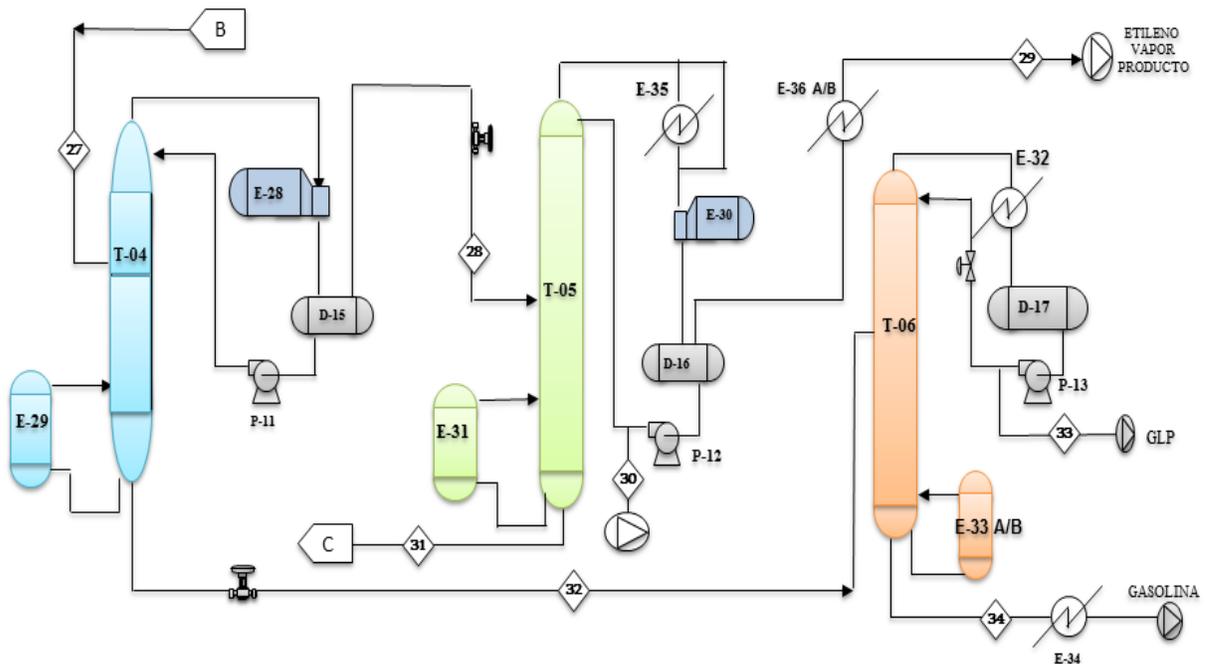


Figura 32. Sistema Compresión Secundaria, secado y enfriamiento, Unidad Etileno. (Autor)

**Enfriamiento:** Realizar enfriamiento del gas de pirolisis desde 55 hasta -140 °F para separar los más livianos H<sub>2</sub> y el C<sub>1</sub>, y luego hasta -205°F para continuar separando los livianos del C<sub>2</sub>=/C<sub>2</sub> en los intercambiadores de la caja fría y sección de enfriamiento.

**Fraccionamiento:** Realizar la separación de los diferentes componentes contenidos en el gas craqueado en las torres:

- Demetanizadora T-03: Separación de Corriente rica en metano por la cima y C2+ por el fondo a 33°F; opera a una presión de 462 psig aproximada.
- Deetanizadora T-04: Separación de C2/C2= por la cima a 8°F y C3+ por el fondo a 197°F; opera a una presión de 320 psig aproximada.
- Separadora Etano-Etileno T-05: Separación C2= por la cima a -23°F y C2 por el fondo 21 °F. Opera a una presión de 280 psig aproximada.
- Debutanizadora T-06: separación de C3=/C3, C4/C4= por la cima a 130°F y C5+ por el fondo a 313°F y 135 psig aproximada.



**Figura 33. Sistema de Fraccionamiento, Unidad Etileno. (Autor)**

**Almacenamiento intermedio:** Almacenar etileno líquido a -23°F y 265 psig, mientras se analiza por laboratorio para ser enviado al tanque criogénico. Comprende Balas D-42ABCD.

**Almacenamiento Criogénico:** Almacenar etileno grado polímero en el tanque criogénico K-02 a -154 °F y 0.5 psig. El tanque almacena etileno cuando no se pueda enviar a la planta de polietileno y, suministra Etileno a polietileno cuando ocurren disturbios operacionales o la producción de etileno no es suficiente en la planta de Etileno.

## Anexo C. Descripción del Proceso Industrial para Obtener PEBD

El polietileno de baja densidad no lineal, se produce por polimerización del etileno gaseoso a alta presión 18000 psig y temperatura (365-513°F) aproximada. El etileno gaseoso es suministrado desde la planta de Etileno.

### POLIMERIZACIÓN: Proceso y Mecanismo de Reacción

La formación del polietileno se logra por un proceso químico denominado polimerización, en el cual los monómeros (etileno) de bajo peso molecular, se agrupan químicamente entre sí, dando lugar a una molécula de gran peso molecular o polímero, que puede ser constituido por una cadena lineal o una macromolécula ramificada. La polimerización que ocurre en el proceso de alta presión del etileno ocurre por un mecanismo de radicales libres (Peacock., 2000).

El esquema cinético general de polimerización por radicales libres, ha sido propuesta tanto para la homopolimerización y copolimerización. Estos esquemas permiten la predicción de las distribuciones de polímero de ramificaciones largas, así como la composición del copolímero y la secuencia de ramificaciones largas (Simon, 1996). Los principios de la polimerización por radicales libres se describen a continuación:

#### Iniciación.

Todo el proceso comienza con una molécula llamada iniciador; en este caso el terbutilperoxiacetato (TBPA) y el terbutilperoxipivalato (TBPP). Lo que hace especiales a estas moléculas, es su alta reactividad química. Debido a la descomposición térmica del iniciador (peróxido) el par de electrones del enlace O-O que se rompe se separa generando los radicales libres, como se muestra en la **Figura 34** (Schuster, 2005):

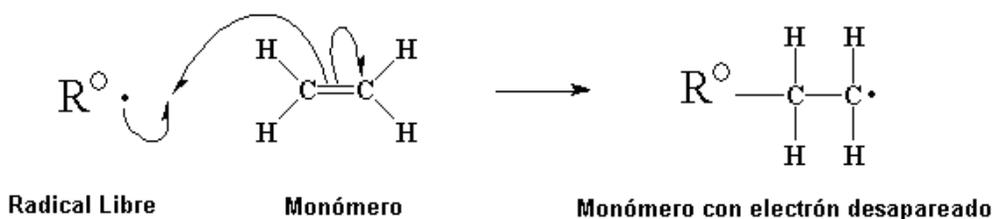


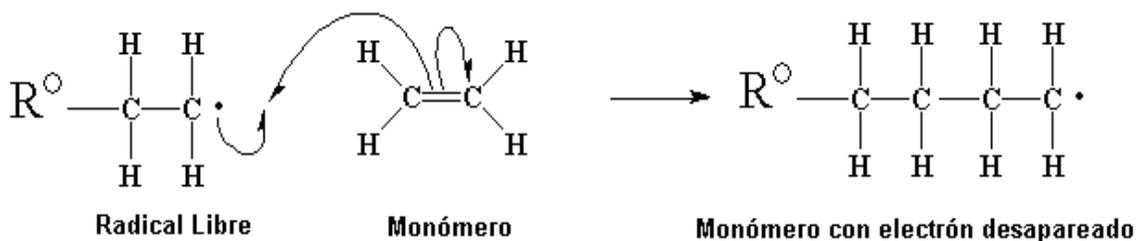
Figura 34. Etapa de Iniciación. (Rodrigo Nuñez B., 2007)

El proceso de iniciación se caracteriza por la energía de activación (energía mínima necesaria para que se produzca la reacción) relativamente alta, que solo puede lograrse elevando el etileno a alta temperatura. En la iniciación, se libera uno de los pares de

electrones compartidos del enlace doble. El proceso completo, desde la ruptura de la molécula de iniciador para generar radicales, hasta la reacción del radical con una molécula de monómero, recibe el nombre de etapa de iniciación de polimerización. (Simon, 1996).

### Propagación de Cadenas.

La etapa de adición cada vez mayor de moléculas monoméricas a las cadenas en crecimiento se denomina propagación. En este caso, la molécula de etileno que queda con un electrón desapareado reacciona, así como el iniciador, con otra molécula de etileno propagándose la reacción de polimerización por adición. (Schuster, 2005)

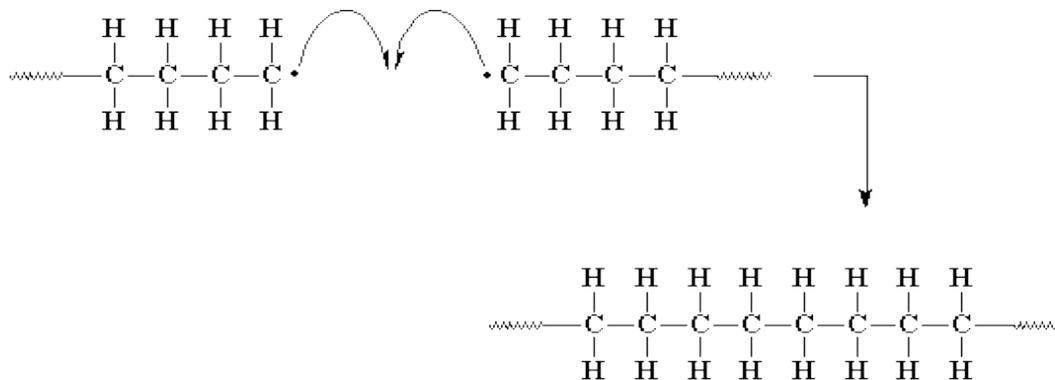


**Figura 35. Etapa de Propagación de Cadenas.** (Rodrigo Nuñez B., 2007)

La reacción de propagación es menos sensible a la temperatura que la de iniciación y, siempre y cuando, se disponga de un suministro satisfactorio de radicales de iniciador se puede sostener la propagación sin dificultades por un amplio rango de temperatura de reacción.

### Terminación.

El crecimiento de la cadena puede terminarse de varias maneras. Una de éstas, la más simple, consiste en que se encuentren dos cadenas en crecimiento. Los dos electrones desapareados se unirán formando un par y se establecerá un nuevo enlace químico que unirá las respectivas cadenas. Esto se llama acoplamiento. (Simon, 1996)

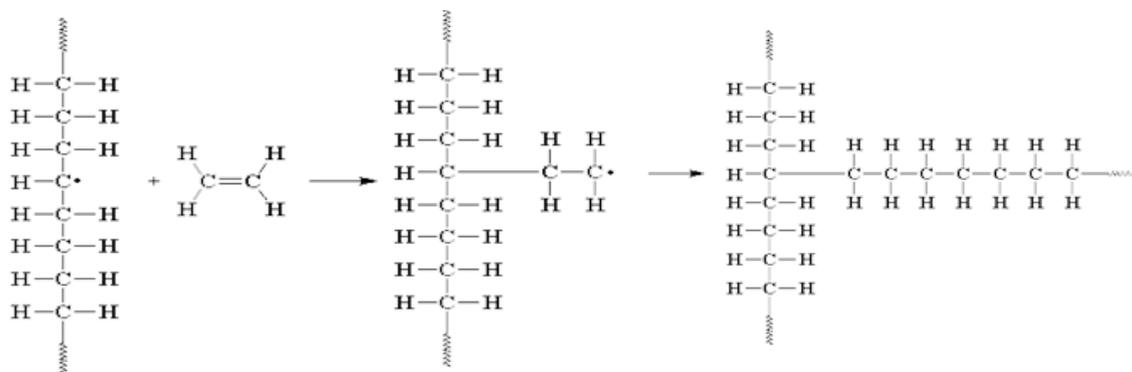


**Figura 36. Terminación de Cadenas.** (Rodrigo Nuñez B., 2007)

El acoplamiento es una de las dos clases principales de reacciones de terminación. La terminación es la tercera y última etapa de una polimerización por crecimiento de cadena. En la Figura anterior: se ilustra la unión de dos electrones desapareados para formar un par y establecer un nuevo enlace químico que unirá las respectivas cadenas.

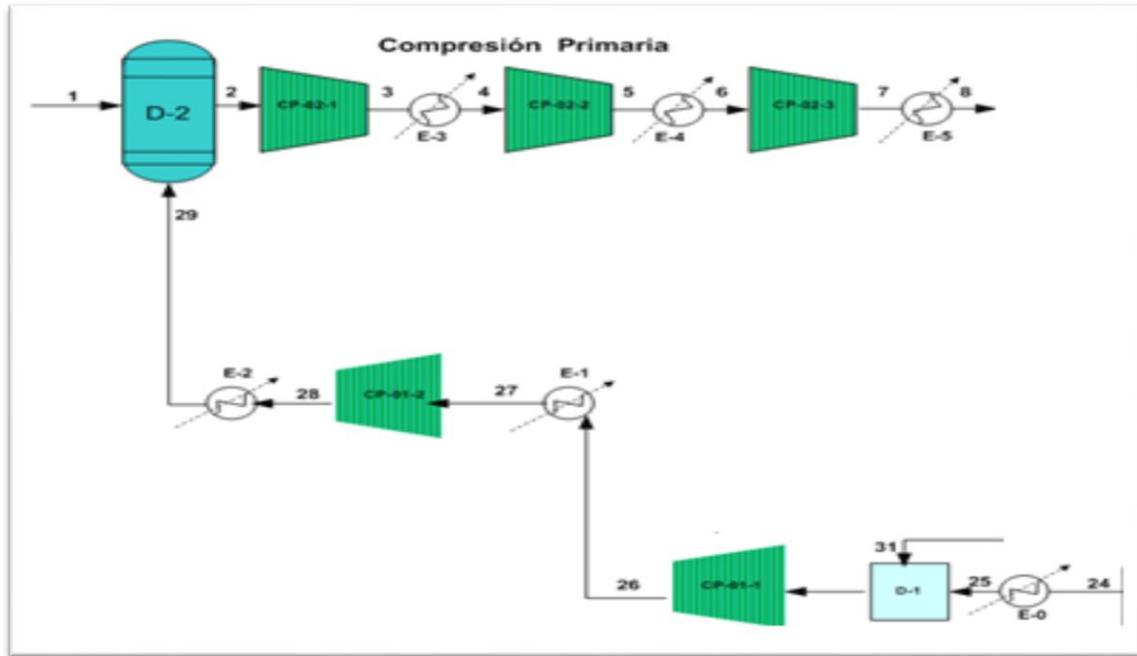
### Transferencia de Cadena.

En ocasiones el electrón desapareado en el extremo de una cadena que se encuentra en crecimiento se aparea con un electrón de un enlace carbono-hidrógeno de una cadena polimérica dejando un electrón desapareado en el medio de la cadena polimérica. El electrón desapareado no puede formar un enlace doble terminal como ocurre en la terminación por desproporción. (Piet D. ledema, 2000)



**Figura 37. Transferencia de Cadenas.** (Rodrigo Nuñez B., 2007)

**Compresión:** Llevar el etileno gaseoso de 200 psig a 18000 psig, aproximadamente.



**Figura 38. Sistema Carga Etileno y Compresión primaria, Unidad PEBD. (Autor)**

**Reacción:** Convertir el etileno gaseoso a polietileno, se requiere de unas condiciones específicas de Temperatura, presión, e iniciador. Reacción de conversión en 15% y 18%.

**Separación:** Separar el etileno gaseoso no convertido y el polietileno. Se realiza en dos etapas a 3000 psig y 5 psig aproximadamente.

**Extrusión:** Formar la pepa de polietileno, y se clasifica.

**Transferencia:** Almacenamiento en tolvas para clasificación del producto, Vo.Bo y posterior empaque.

- ❑ **Sistema de Transferencia 1:** Transfiere los pellets de PE desde el alimentador hasta las tolvas horarias, mediante aire suministrado por los compresores. Las tolvas horarias están conectadas a un colector de polvo, que cumple la función ambiental de retirar los finos que puede arrastrar la corriente de transporte de polietileno y evitar su descarga a la atmósfera.

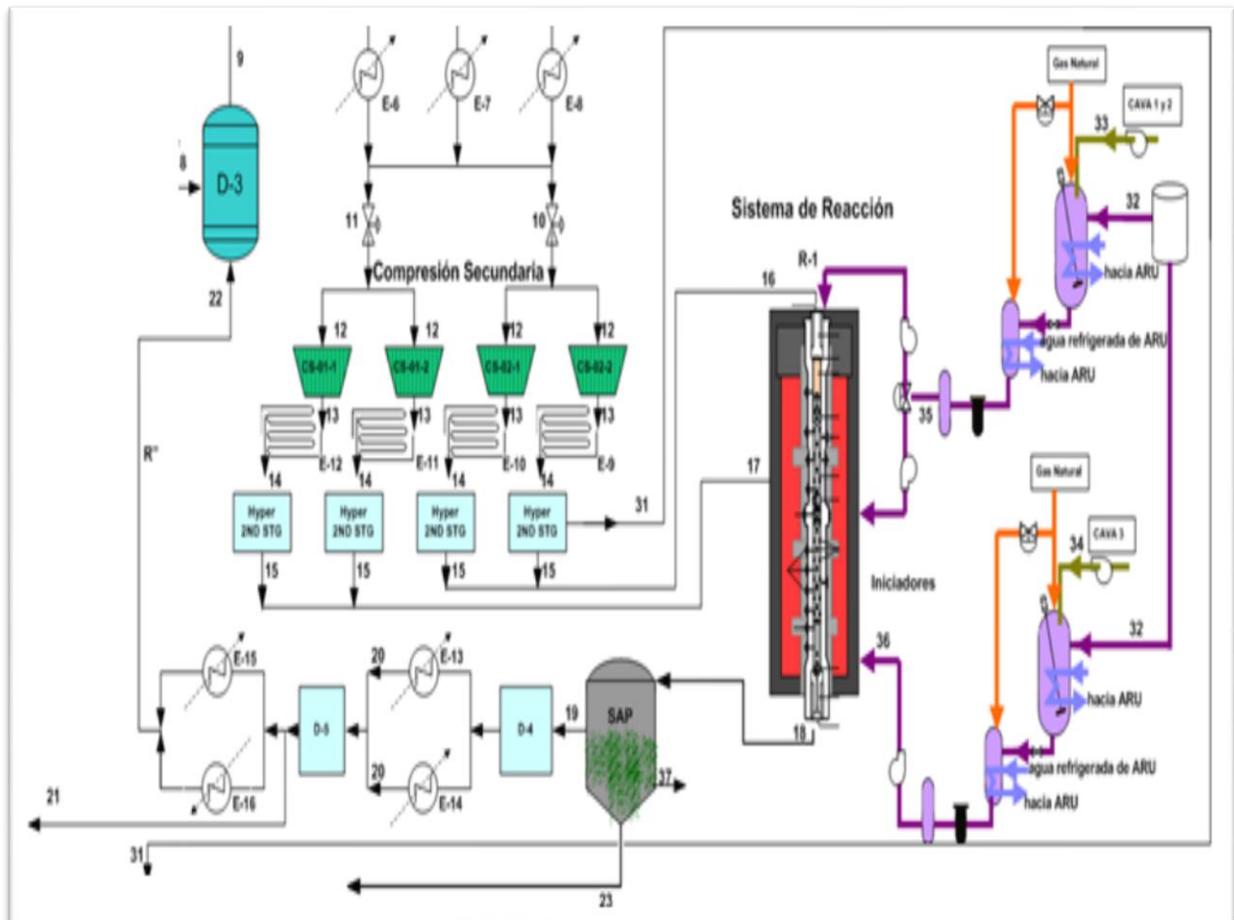


Figura 39. Sistema Compresión Secundaria y Polimerización, Unidad PEBD. (Autor)

- ❑ **Sistema de Transferencia 2:** El sistema comprende el transporte de polietileno desde las tolvas horarias hasta las tolvas almacenamiento. Dependiendo de la calidad del producto, éste puede enviarse hacia los destinos anteriormente mencionados utilizando para su transporte aire de los sopladores. Cuando el producto está dentro de especificaciones de calidad (prime) se envía hacia una de las cuatro (4) tolvas de mezcla. El objetivo del envío hacia estas tolvas es la de homogenizar la producción.
- ❑ **Sistema de Transferencia 3:** Este sistema comprende el transporte de producto desde las tolvas de mezclado hacia los siguientes destinos:
  - Recirculación de las mismas tolvas

- Tolvas de almacenamiento
- Tolvas de empaque
- Tolva de despacho a granel

❑ **Sistema de Transferencia 4:** Comprende el transporte de polietileno desde las tolvas de almacenamiento hasta los siguientes destinos:

- Tolvas de empaque
- Tolva de despacho a granel
- Tolvas de empaque de PE.

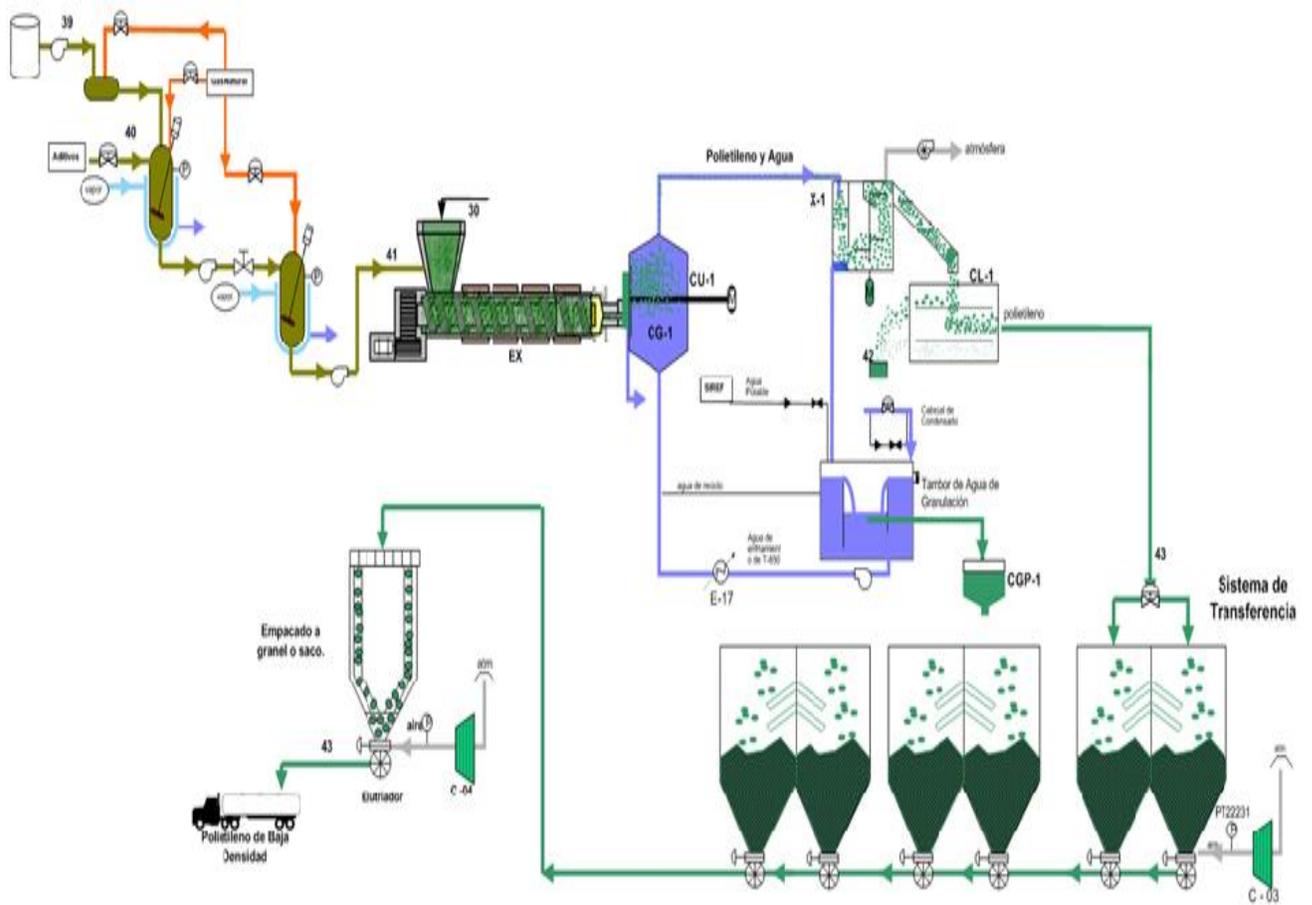


Figura 40. Sistema de Extrusión y Transferencia del PE, Unidad PEBD. (Autor)

## Anexo D. Inventario de la Unidad de Etileno

En este anexo se encuentra en detalle, el balance másico para cada etapa descrita en el   
 ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., calculado para la producción de 1   
 onelada de Etileno, estimando una base de cálculo de 1 hora. Es de enunciar que algunos   
 balances contienen flujos de reciclo.

**Tabla 34. Balance Másico Etapa Compresión Primaria, lavado y Conversión, Unidad Etileno.**

Corriente	Flujo Másico		Unidad
	Entrada	Salida	
1	1,4229	-	tonelada
25	0,2222	-	tonelada
36	0,8004	-	tonelada
37	0,6847	-	tonelada
38	0,2553	-	tonelada
18	-	3,3855	tonelada
<b>Total</b>	<b>3,3855</b>	<b>3,3855</b>	toneladas

**Tabla 35. Balance Másico Etapa Secado, Enfriamiento y Fraccionamiento I, Unidad Etileno.**

Corriente	Flujo Másico		Unidad
	Entrada	Salida	
18	3,3855	-	tonelada
31	1,6421	-	tonelada
23		0,9548	tonelada
24		0,9230	tonelada
25		0,2222	tonelada
26		2,9149	tonelada
35		0,0126	tonelada
<b>Total</b>	<b>5,0276</b>	<b>5,0276</b>	Toneladas

**Tabla 36. Balance Másico Etapa de Fraccionamiento Continua, Unidad Etileno.**

Corriente	Flujo Másico		Unidad
	Entrada	Salida	
27	2,914912335	-	tonelada
29	-	1,0010	tonelada
30	-	0,2189	tonelada
31	-	1,6421	tonelada
33	-	0,0514	tonelada
34	-	0,0015	tonelada
<b>Total</b>	<b>2,9149</b>	<b>2,9149</b>	toneladas

**Tabla 37. Balance Másico Consumo de Gas Combustible (160°F, 120psig), Unidad Etileno.**

Equipo	Generación (lb/h)	Consumo (lb/h)
D-14	1161	-
D-12	1910	-
Límites Externos	5281	-
H-00 A	-	2784
H-00 B	-	2784
H-00 C	-	2784
<b>Total</b>	<b>8352</b>	<b>8352</b>

Al igual que los balances másicos, se presentan en detalle los consumos y generación de servicios industriales (energía eléctrica, vapor de alta, media y baja presión, condensado, agua de enfriamiento, etc.), por los diferentes equipos utilizados en la unidad de Etileno. Los valores de consumo y generación, se determinaron para la producción de 1 tonelada de Etileno, estimando una base de cálculo de 1 MJ.

**Tabla 38. Balance Energético Consumo de Energía Eléctrica, Unidad Etileno.**

Nivel Tensión	EQUIPO	Consumo(MJ)
6300 V, trifásico, 60 Hz	MP 00 A	648
	MP 23	714,24
	<b>Subtotal</b>	<b>1362,24</b>
460 v, Trifásico, 60 Hz	MP 01 A	101,52
	MP 01 B	101,52
	MP 02 A	124,2
	MP 02 B	124,2
	MP 03 A	3,6
	MP 03 B	3,6
	MP 05 A	16,56
	MP 05 B	16,56
	MP 07 A	10,8
	MP 07 B	10,8
	MP 08 A	55,08
	MP 08 B	55,08
	MP 09 A	7,2
	MP 09 B	7,2
	MP 10 A	55,8
	MP 10 B	55,8
	MP 11 A	33,12
	MP 11 B	33,12
	MP 12 A	261
	MP 12 B	261
	MP 13 A	261
	MP 13 B	261
	MP 14 A	54,72
	MP 14 B	54,72
	MP 18	70,2
	MP 19	76,32
	MP 20	36
	MP 26	10,8
	MP 36 A	18,72
	MP 36 B	18,72
MP 37 A	3,6	
MP 37 B	3,6	
MP 39 B	3,6	
MP 40 A	3,6	
MP 45	3,6	
MC 05	396	
	<b>Subtotal</b>	<b>2613,96</b>
208 v, Trifásico, 60 Hz	Bombas Auxiliares	21,6
	<b>Subtotal</b>	<b>21,6</b>

Total

3997,8

**Tabla 39. Balance Energético Consumo de Agua Industrial (90°F, 55 psig), Unidad Etileno.**

Equipos consumidores	lb/h	gpm
E 04 A	190833	381,666
E 05	28090	56,180
E 06	27127	54,254
E 07	21722	43,445
E 09	19154	38,308
E 11	1913	3,827
E 14	17014	34,029
E 15	22311	44,623
E 16	25790	51,579
E 32	11798	23,596
E 34	2889	5,778
E 35	33708	67,416
E 44	248796	497,592
E 45 A-B	1071,268	2142,536
E 50	636	1,271
E 67	1979	3,958
E 69	9913	19,827
E 74	19262	38,523
E 76	15196	30,392
E 77 A	14238	28,475
E 78 A	1915	3,830
E 79 A	14157	28,315
NP 37 A	177	0,353
NP 38 A	177	0,353
NP 39 A	177	0,353
P 01	321	0,642
P 02 A	642	1,284
P 08 A	1287	2,575
P 13 A	562	1,124
P 23 A	642	1,284
P 36 A	321	0,642
W 16-17	322	0,642
W 28	5132	10,263
<b>Total</b>	<b>1809467</b>	<b>3619</b>

**Tabla 40. Balance Energético Consumo de Agua Cruda (150°F, 120 psig), Unidad Etileno.**

Equipo	lb/h	Gpm
Cuarto Control	96	0,193
D 00-01	482	0,964
D 02	3531	7,063
D 11	241	0,482
D 15	241	0,482
D 22	14446	28,892
D 23	241	0,482
D 24	1124	2,247
D 37	2568	5,136
D 60	241	0,482
E 53	3531	7,063
E 67	1445	2,889
Mangueras	642	1,284
P 01	2568	5,136
P 02	241	0,482
T 04	241	0,482
T 06	3531	7,063

Total	35409	70,82
-------	-------	-------

**Tabla 41. Balance Energético - Vapor Alta Presión (780°F, 465 psig), Unidad Etileno.**

Equipo	Generación (lb/h)	Consumo (lb/h)
H-00 A-B-C	13409	-
W-01	1359	-
Límites Externos	11396	-
W-18	-	14
E-02 A/B	-	3256
D-59	-	286
E-09	-	50
NP-38 A	-	116
NP-37 A	-	389
NC-00	-	9079
NC-02	-	2612
NC-01	-	9984
NP-39 A	-	378
<b>Total</b>	<b>26164</b>	<b>26164</b>

**Tabla 42. Balance Energético - Vapor Media Presión (550°F, 200 psig), Unidad Etileno.**

Equipo	Generación (lb/h)	Consumo (lb/h)
W-18	77	-
Límites Externos	1772	-
E-00 A-B-C-D	-	140
W-07	-	71
W-29	-	29
W-09	-	42
W-31	-	9
W-08	-	71
W-30	-	29
E-80	-	1254
E-33 A/B	-	117
W-23	-	43
W-03	-	43
<b>Total</b>	<b>1849</b>	<b>1849</b>

**Tabla 43. Balance Energético - Vapor Baja Presión (450°F, 55 psig), Unidad Etileno.**

Equipo	Generación (lb/h)	Consumo (lb/h)
D-27	102	-
D-41	405	-
NP-39 A	378	-
NP-37A	389	-
NP-38C	116	-
W-03	106	-
W-23	145	-
Límites Externos	1409	-
D-22	-	839
E-29	-	1722
E-13	-	453
K-13	-	18
Tambor desgasific.	-	18
<b>Total</b>	<b>3050</b>	<b>3050</b>

**Tabla 44. Balance Energético – Circuito Condensado, Unidad Etileno.**

<b>Equipo</b>	<b>Generación (lb/h)</b>	<b>Consumo (lb/h)</b>
<b>Alta y Media Presión</b>		
E 49	50,24	-
E 66	3256,02	-
E 80	1254,25	-
E 33	117,17	-
<b>Baja Presión</b>		
E 13	453,45	-
E 29	1721,51	-
D 41	4272,39	-
<b>Condensado Limpio</b>		
E 70	9149,28	-
E 71	10054,57	-
E 72	2653,29	-
Límites Externos Unidad	-	18173,84
D 22	-	<b>14808,35</b>
<b>Total</b>	<b>32982,18</b>	<b>32982,18</b>

## Anexo E. Inventario de la Unidad de PEBD

En este anexo se encuentra en detalle, el balance másico para cada etapa descrita en el ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., calculado para la producción de 1 onelada de PEBD, estimando una base de cálculo de 1 hora. Es de enunciar que algunos balances contienen flujos de reciclo.

**Tabla 45. Balance Másico Etapa Carga y Compresión Primaria, Unidad PEBD.**

Corriente	Flujo Másico		Unidad
	Entrada	Salida	
1	1,1174	-	tonelada
29	0,3034	-	tonelada
8	-	1,4209	tonelada
	<b>1,4209</b>	<b>1,4209</b>	toneladas

**Tabla 46. Balance Másico Etapa Compresión Secundaria y Polimerización, Unidad PEBD.**

Corriente	Flujo Másico		Unidad
	Entrada	Salida	
8	1,4209	-	tonelada
32	0,0074	-	tonelada
33	0,0017	-	tonelada
34	0,0005	-	tonelada
37	-	0,0038	tonelada
21	-	0,1170	tonelada
23	-	1,2435	tonelada
31	-	0,0662	tonelada
	<b>1,4304</b>	<b>1,4304</b>	toneladas

**Tabla 47. Balance Másico Etapa Extrusión y Transferencia de PE, Unidad PEBD.**

Corriente	Flujo Másico		Unidad
	Entrada	Salida	
30	1,0024	-	tonelada
39	0,0080	-	tonelada
40	0,0024	-	tonelada
43	-	0,0236	tonelada
44	-	0,9892	tonelada
	<b>1,0128</b>	<b>1,0128</b>	toneladas

**Tabla 48. Balance Energético del Agua enfriamiento, Compresión Primaria, Unidad PEBD.**

EQUIPO	Temperatura Etileno (°F)		Temperatura Agua (°F)		Energía Transferida		Consumo Agua (tonelada/h)
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	BTU/h	MJ/h	
<b>E-0</b>	409,10	95,00	89,00	95,19	81987	86,50	6,025
<b>E-1</b>	188,00	104,00	89,00	91,50	28038	29,58	5,098
<b>E-2</b>	196,50	96,00	89,00	92,10	33546	35,39	4,919
<b>E-3</b>	241,00	101,00	89,00	98,40	218812	230,86	10,581
<b>E-4</b>	205,80	114,50	89,00	98,00	219467	231,55	11,084
<b>E-5</b>	176,50	120,00	89,00	98,00	128927	136,03	6,511

<b>Total</b>	<b>710777</b>	<b>749,91</b>	<b>44,218</b>
--------------	---------------	---------------	---------------

Al igual que los balances másicos, se presentan en detalle los consumos y generación de servicios industriales (agua de enfriamiento, lubricante, etc.), por los diferentes equipos utilizados en la unidad de PEBD. Los valores de consumo y generación, se determinaron para la producción de 1 tonelada de PEBD, estimando una base de cálculo de 1 MJ.

**Tabla 49. Balance Energético del Agua enfriamiento, Compresión Secundaria, Unidad PEBD.**

EQUIPO	Temperatura Etileno (°F)		Temperatura Agua (°F)		Energía Transferida		Consumo Agua (tonelada/h)
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	BTU/h	MJ/h	
<b>E-6</b>	120,39	69,10	44,00	47,80	270219	285,10	32,323
<b>E-7</b>	120,39	69,10	44,00	47,80	270219	285,10	32,323
<b>E-8</b>	120,39	69,10	44,00	47,80	270219	285,10	32,323
<b>E-9</b>	145,50	106,50	44,00	49,00	77650	81,93	7,059
<b>E-10</b>	145,50	106,50	44,00	57,50	77650	81,93	2,614
<b>E-11</b>	145,50	106,50	44,00	49,84	77650	81,93	6,049
<b>E-12</b>	145,50	106,50	44,00	59,00	77650	81,93	2,353
<b>E-13</b>	509,00	322,50	150,00	251,90	697377	735,77	3,111
<b>E-14</b>	509,00	166,00	150,00	251,90	1282576	1353,19	3,111
<b>E-15</b>	322,50	120,50	89,00	101,00	1569631	1656,05	59,456
<b>E-16</b>	322,50	491,30	89,00	101,00	-3240553	-3418,96	59,456
<b>Total</b>					<b>1430292</b>	<b>1509,04</b>	<b>240,177</b>

**Tabla 50. Balance Energético del Agua enfriamiento, Extrusión, Unidad PEBD.**

EQUIPO	Consumo Agua (tonelada/h)	Salida Agua Aceitosa (tonelada/h)
EX	1,13562	1,13562
Granulador	1,13562	1,13562
<b>Total</b>	<b>2,27124</b>	<b>2,27124</b>

**Tabla 51. Balance Energético del Agua enfriamiento, Extrusión, Unidad PEBD.**

Equipo	Consumo Lubricante (galón de aceite)
Compresor Primario I (CP-01)	55
Compresor Primario II (CP-02)	55
Compresor Secundario I (CS-01)	61
Compresor Secundario II (CS-02)	61
<b>Total</b>	<b>232</b>

Para la determinación de las emisiones generadas por el consumo de ACPM como fuente de combustión para el transporte del PEBD utilizando un tracto camión tipo N o V, se tuvo en cuenta los factores de emisión considerados para la gasolina y el ACPM, suministrados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Por su parte, el factor de emisión del Gas Natural se ha tomado del IPCC (Rheynell, 2011):

**Tabla 52. Factores de emisión de CO<sub>2</sub> - Combustibles**

Combustible	Factor de Emisión (kg CO <sub>2</sub> /GJ)	Fuente	Incertidumbre
ACPM	74,869	UPME	5 %
Gas Natural	56,100	IPCC	5 %

Para convertir el factor de emisión expresado en kg CO<sub>2</sub>/GJ en kg CO<sub>2</sub>/L, se consideran el Valor Calorífico Neto – VCN - (MJ/kg) y el factor de litros por kilogramo (L/kg) de cada combustible. Estos datos son:

**Tabla 53. VCN y factor de L/kg - Combustibles**

Combustible	VCN (MJ/Kg)	Fuente	L/kg	Fuente <sup>1</sup>
ACPM	43,835	UPME	1,185	IEA
Gas Natural	48,000	IPCC <sup>2</sup>	1,428	-

En efecto, los factores de emisión de CO<sub>2</sub> expresados en kg CO<sub>2</sub>/L son los siguientes:

**Tabla 54. Factores de Emisión CO<sub>2</sub>/L - Combustibles**

Combustible	Factor de emisión (kg CO <sub>2</sub> /L)
ACPM	2,770
Gas Natural	1,885

Los Factores de Emisión de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O fueron tomados del IPCC.<sup>3</sup>

**Tabla 55. Factores de Emisión CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O - Combustibles**

Combustible	Factor de Emisión (kg CH <sub>4</sub> /GJ)	Factor de Emisión (kg N <sub>2</sub> O/GJ)	Fuente	Incertidumbre (CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O)	
ACPM	0,0039	0,0039	IPCC	140 %	200 %
Gas Natural	0,0920	0,0030	IPCC	1500%	2400%

Al convertir estos factores de emisión a kg CH<sub>4</sub>/L y kg N<sub>2</sub>O/L tenemos:

**Tabla 56. Factores de Emisión CH<sub>4</sub>/L y N<sub>2</sub>O/L - Combustibles**

Combustible	Factor de emisión (kg CH <sub>4</sub> /L)	Factor de emisión (kg N <sub>2</sub> O/L)
ACPM	0,00014	0,00014
Gas Natural	0,00309	0,00010

<sup>1</sup> International Energy Agency - IEA - Statistics Manual, OECD/IEA, 2004, tabla A3.8, página 181

<sup>2</sup> IPCC – Directrices 2006. Volumen 2, Capítulo 1, Tabla 1.2.; <sup>3</sup> IPCC – Directrices 2006. Volumen 2, Capítulo 3, Tabla 3.2.2.

Finalmente se determinaron las emisiones para cada ciudad respecto al consumo de combustible utilizado, como se visualiza en la siguiente tabla:

**Tabla 57. Emisiones generadas en el transporte de PEBD, por medio Tracto Camión tipo V**

Emisiones Uso de Tracto Camión Tipo V					
Contaminante	Factor (Kg/L)	Barranquilla	Bogotá	Cali	Medellín
Kg CO2/L*	2,7700	35,9052	41,3069	54,0167	34,9520
Kg CH4/L*	0,0001	0,0018	0,0021	0,0027	0,0018
Kg N2O/L*	0,0001	0,0018	0,0021	0,0027	0,0018
Kg NOx/Km	0,0038	2,3751	1,7898	2,6753	1,2870
Kg CO/Km	0,0016	0,9871	0,7438	1,1118	0,5349
Kg SOx/Km	0,0002	0,1049	0,0790	0,1181	0,0568
Kg MP/Km	0,0003	0,1844	0,1389	0,2077	0,0999

\* (Sistema de Información Ambiental Minero Energético);

Para determinar las emisiones generadas en el proceso de extrusión de película soplada se utilizaron las siguientes fórmulas (Southwest Clean Air Energy, April 16, 2013):

$$\text{Emisión VOCs} = 0.837 \cdot T - 22.72$$

$$\text{Emisión de PMs} = 0.3561 \cdot T - 124.17$$

Dónde:

VOCs: Emisiones de vapores orgánicos, lb VOCs/millón de lb de Polietileno

T: Temperatura, °F (típicamente 425°F)

PMs: Emisiones de material particulado, lb PMs/millón de lb de Polietileno

Se tuvo en cuenta las Emisiones de Ozono, generadas por los tratadores corona en extrusoras de película soplada (Southwest Clean Air Energy, April 16, 2013):

$$\text{Ozono} = 0.072 \frac{\text{lb Ozono}}{\text{kWh del tratador}}$$

**Tabla 58. Cálculos para determinar los kWh/h de un Tratador de Extrusor**

Productividad, lb/h	kW Tratador corona	kW/(lb/h) Tratador corona	kWh Tratador	Emisión lb/h	Emisión lb/año
900	10	0,01111	87600	0,00072	6,3072
1200	15	0,01250	131400	0,00144	12,6144
1700	20	0,01176	175200	0,00108	9,4608

En este proceso no se consideran las emisiones de NOx, SO<sub>2</sub>, CO. Para la determinación del Consumo específico de energía, se utilizó el siguiente factor (Focus on Energy, July 2006):

$$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 0.611 \frac{\text{kW}}{\frac{\text{lb}}{\text{h}}} = 0.611 \frac{\text{kWh}}{\text{lb PE}}$$

## **Anexo F. Categorías de Impacto Potencial**

**Potencial de acidificación, AP:** Una categoría de impacto ambiental (lluvia ácida). Las emisiones (por ejemplo, óxidos de azufre, óxidos nitrógeno, amoníaco) del transporte, la energía generación, los procesos de combustión, y la agricultura causa acidez del agua de lluvia y por lo tanto el daño a los bosques, lagos y edificios. Sustancia de referencia: el dióxido de azufre. Esta categoría proviene del efecto de la deposición de sustancias inorgánicas como sulfatos, nitratos y fosfatos en el suelo (Los factores de caracterización se dan únicamente por las emisiones al aire; la acidificación y nitrificación terrestre se toma directamente del Eco-indicador 99; las categorías de punto medio ( $\text{kgeqSO}_2$  al aire/kg emitido) se obtienen por la división del factor de la sustancia considerada por el factor de daño de la sustancia de referencia ( $\text{SO}_2$  al aire)).

### **Potencial de Agotamiento de energía no renovable**

El petróleo tiene un contenido energético implícito debido a la cantidad de energía no renovable que es extraída de la tierra y que como su nombre lo dice no se puede recuperar de ninguna forma posible. Esta categoría cuantifica esa energía de los combustibles fósiles como un daño directo a la naturaleza. Los factores de caracterización para el consumo de energía no renovable, en términos de la energía total primaria extraída, son calculados por el valor superior de calentamiento. La energía no renovable (MJ de energía total primaria no renovable /kg usado) para las versiones 2.0 y 2.1 han sido tomados de Ecoinvent.

**Potencial de Agotamiento del ozono, ODP:** Una categoría de impacto ambiental (agujero de ozono). El índice ODP se calcula como la contribución a la ruptura de la capa de ozono que resultaría de la emisión de 1 kg de la sustancia en cuestión en relación con la emisión de 1 kg de CFC-11 como una referencia de la sustancia.

**Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential):** Factor que describe el impacto de la fuerza de radiación de una actividad con base en la masa de un GEI determinado, con relación a la unidad equivalente de dióxido de carbono en un período determinado. El calentamiento global está asociado a un cambio climático que puede tener causa antropogénica o no. El principal efecto que causa el calentamiento global es el efecto invernadero, fenómeno que se refiere a la absorción, por ciertos gases atmosféricos; principalmente  $\text{CO}_2$  de parte de la energía que el suelo emite, como consecuencia de haber sido calentado por la radiación solar.

**Potencial de creación de ozono fotoquímico, POCP:** Una categoría de impacto ambiental (smog de verano). El índice utilizado para traducir el nivel de emisiones de diversos gases en una medida común para comparar sus contribuciones a la cambio de la concentración de ozono a nivel del suelo. El índice PCOF se calcula como la contribución

a la formación de ozono cerca del suelo debido la sustancia en cuestión en relación a la emisión de 1 kg de eteno como referencia sub- postura.

### **Potencial de Eutrofización Acuática**

Sustancias acuáticas que contienen nitrógeno y fósforo pueden promover la eutrofización en el agua. Para el impacto en la vida acuática, el aumento de nutrientes en el área contribuye a la generación de fitoplancton. La generación de una gran cantidad de fitoplancton en un tiempo corto puede aumentar el riesgo del surgimiento de una marea roja y causar también un aumento en el consumo de oxígeno por descomposición de cuerpo de fitoplancton (sustancias orgánicas). Estos fenómenos pueden causar serios daños a los peces y a la biodiversidad.

**Potencial de Nutricación, NP:** Una categoría de impacto ambiental ("sobre-fertilización"). Emisiones tales como fosfatos, nitratos, óxidos de nitrógeno y amoníaco del transporte, la energía generación, la agricultura (fertilizantes) y las aguas residuales aumento el crecimiento de las plantas acuáticas y puede producir la proliferación de algas que consumen el oxígeno del agua y por lo tanto Smother otra la vida acuática. Esto se conoce como eutrofización y hace presa-edades a los ríos, lagos, plantas y peces. Sustancia de referencia: fosfato.

## Anexo G. Inventario Ciclo de Vida, Caracterización de Impactos Ambientales

**Tabla 59. Inventario Ambiental Global del Ciclo de Vida para la Producción de Etileno.**

Título:		Analizando 1 p (PEBD), modelo base					
Método:		IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+					
Indicador:		Inventario					
No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Steam Cracking Ethylene	Ethylene Polimerization	Extrusión Cliente	Pellets Road Transport
1	Acetic acid	Aire	G	x	3,102	x	x
2	Acetic acid	Agua	G	x	1,2408	x	x
3	BOD5, Biological Oxygen	Agua	G	x	31,592	x	x
4	Calcium, ion	Agua	G	641,66874	x	x	0,199755
5	Carbon dioxide	Aire	kg	x	x	x	35,692835
6	Carbon dioxide, fossil	Aire	kg	1813,5755	1391,7782	1194,6609	0,00224138
7	Carbon dioxide, in air	Crudo	kg	1,42968	0,00171024	x	x
8	Carbon monoxide	Aire	kg	0,87744226	0,67259798	0,57735285	1,08E-06
9	Carbon monoxide, fossil	Aire	G	x	x	x	763,2
10	Chloride	Agua	G	441,68833	x	x	0,1375
11	COD, Chemical Oxygen	Agua	G	x	31,592	x	x
12	Dinitrogen monoxide	Aire	g	18,892049	14,496975	12,446049	2,34E-05
13	DOC, Dissolved Organic	Agua	g	x	9,264	x	x
14	Ethene	Aire	g	x	53,970637	x	x
15	Heat, waste	Aire	MJ	1506,2794	708,73448	2,38	715,509
16	Hydrogen, in ground	Crudo	g	759,924	x	x	x
17	Magnesium	Agua	g	385,45739	x	x	0,119995
18	Methane	Crudo	kg	215,97403	1,527	x	x
19	Methane, fossil	Aire	g	242,16648	185,80731	159,42131	0,0002991
20	Methane, fossil	Aire	g	x	x	x	15,57101
21	Nitrate	Agua	g	995,21214	x	x	0,309815
22	Nitrogen oxides	Aire	kg	2,6273058	2,0153528	1,7300608	1,8254887
23	Nitrogen, in air	Crudo	g	208,868	x	x	x
24	Oil waste	Desecho	g	x	122,892	0,00147	x
25	Oils, unspecified	Agua	mg	x	51,7902	0,0006195	x
26	Oxygen, in air	Crudo	g	351,076	x	x	x
27	Ozone	Aire	mg	x	x	326,58653	x
28	Particulates, < 10 um	Aire	g	101,30227	77,037045	66,12588	0,00012406
29	Particulates, < 2.5 um	Aire	g	x	0,17400662	26,879432	143,1
30	Particulates, > 10 um	Aire	g	x	296,86124	x	x
31	Phosphate	Agua	kg	1,4495408	x	x	0,00045125
32	Potassium, ion	Agua	g	626,31405	x	x	0,194975
33	Sodium, ion	Agua	g	360,41768	x	x	0,1122
34	Sulfate	Agua	kg	1,540368	x	x	0,00047953
35	Sulfur dioxide	Aire	g	x	x	x	95,4
36	Sulfur oxides	Aire	kg	2,8205284	0,075875917	0,065126999	0,02577112
37	TOC, Total Organic C	Agua	g	x	9,264	x	x
38	VOC, volatile organic	Aire	g	82,244928	64,648429	66,853529	0,00010157
39	Waste, final, inert	Desecho	g	x	x	x	28,3481
40	Wáter	Aire	mg	x	43,2	x	x
41	Water, cooling, surface	Crudo	tonelada	820,76052	379,01334	x	x
42	Water, cooling,	Crudo	m3	x	0,112	1,48	x
43	Water, river	Crudo	cm3	x	916,08334	x	x
44	Water, unspecified	Crudo	l	x	26,4	x	x

**Tabla 60. Inventario Ambiental de Producción de Etileno.**

<b>Título:</b> Analizando 1 Tonelada (Steam Cracking Ethylene), modelo base <b>Método:</b> IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+ <b>Compartimento:</b> Todos los compartimentos <b>Indicador:</b> Inventario								
No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Caustic Wash and Compression	Drying and cooling	Fractionation	Emission Ethylene	Energía Eléctrica
1	Calcium, ion	Agua	g	387,15372	45,085519	209,42951	x	x
2	Carbon dioxide, fossil	Aire	kg	280,69808	109,65435	427,60237	x	995,62069
3	Carbon dioxide, in air	Crudo	kg	0,71484	0,71484	x	x	x
4	Carbon monoxide	Aire	g	135,68998	53,011784	206,67305	0,9062785	481,16117
5	Chloride	Agua	g	266,49464	31,034311	144,15938	x	x
6	Dinitrogen monoxide	Aire	g	2,9234574	1,1419284	4,454227	x	10,372436
7	Heat, waste	Aire	MJ	306,43567	9,9981084	1189,8457	x	x
8	Hydrogen, in ground	Crudo	g	379,962	379,962	x	x	x
9	Magnesium	Agua	g	232,56745	27,083361	125,80658	x	x
10	Methane	Crudo	kg	107,98702	107,98702	x	x	x
11	Methane	Aire	g	37,528888	14,670129	57,107043	x	132,86042
12	Nitrate	Agua	g	600,46571	69,926511	324,81992	x	X
13	Nitrogen oxides	Aire	kg	0,40651946	0,15880947	0,619252	0,0009063	1,4418186
14	Nitrogen, in air	Crudo	g	104,434	104,434	x	x	X
15	Oxygen, in air	Crudo	g	175,538	175,538	x	x	X
16	Particulates, < 10 um	Aire	g	15,542719	6,0725125	23,671986	0,9062785	55,108771
17	Phosphate	Agua	kg	0,87458694	0,10184897	0,4731049	x	X
18	Potassium, ion	Agua	g	377,88939	44,006654	204,418	x	X
19	Sodium, ion	Agua	g	217,45962	25,323998	117,63406	x	X
20	Sulfate	Agua	kg	0,92938793	0,10823075	0,5027493	x	X
21	Sulfur oxides	Aire	kg	0,01530977	0,005981743	0,0233156	2,721645	0,05427631
22	VOC, volatile organic	Aire	g	12,747281	4,9832763	19,395106	x	45,119265
23	Water, cooling,	Crudo	ton	160,55132	4,4259843	655,78321	x	X

**Tabla 61. Inventario Ambiental de Producción de PEBD.**

<b>Título:</b> Analizando 1 Tonelada (Ethylene Polymerization), modelo base <b>Método:</b> IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+ <b>Compartimento:</b> Todos los compartimentos <b>Indicador:</b> Inventario								
No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Primary Compression	Secondary Compression	Extrusion Neumatic Transport	Energía Térmica	Energía Eléctrica
1	Acetic acid	Aire	g	x	3,102	X	x	x
2	Acetic acid	Agua	g	x	1,2408	X	x	x
3	BOD5, Biological Oxygen	Agua	g	x	31,592	X	x	x
4	Carbon dioxide, fossil	Aire	kg	19,85659	109,00376	43,168221	287,17782	932,43471
5	Carbon dioxide, fossil	Aire	g	x	137,06	x	x	x
6	Carbon dioxide, in air	Crudo	g	0,84952	0,86072	x	x	x
7	Carbon monoxide	Aire	g	9,5962448	52,679074	20,862234	138,83562	450,6248
8	COD, Chemical Oxygen	Agua	g	x	31,592	x	x	x
9	Dinitrogen monoxide	Aire	g	0,20686715	1,1356077	0,44972913	2,9906104	9,714161
10	DOC, Dissolved Organic C	Agua	g	x	9,264	x	x	x
11	Ethene	Aire	g	x	x	53,970637	x	x
12	Heat, waste	Aire	MJ	79,5924	432,3186	196,82348	x	x
13	Methane	Crudo	kg	0,7585	0,7685	x	x	x
14	Methane	Aire	g	2,6497589	14,545987	5,7605754	38,422412	124,42858

15	Nitrogen oxides	Aire	kg	0,028755529	0,15785494	0,06251452	0,41591271	1,3503152
16	Oil waste	Desecho	g	5,1646	5,7274	112	x	x
17	Oils, unspecified	Agua	mg	2,17651	2,41369	47,2	x	x
18	Particulates, < 10 um	Aire	g	1,0990855	6,0334856	2,3894116	15,90371	51,611353
19	Particulates, < 2.5 um	Aire	mg	x	x	174,00662	x	x
20	Particulates, > 10 um	Aire	g	x	x	296,86124	x	x
21	Sulfur oxides	Aire	g	1,082483	5,9423454	2,3533178	15,666045	50,831725
22	TOC, Total Organic C	Agua	g	x	9,264	x	x	x
23	VOC, volatile organic	Aire	g	0,96478188	5,011804	3,3642856	13,051737	42,255821
24	water	Aire	mg	x	x	43,2	x	x
25	Water, cooling, surface	Crudo	ton	44,218	240,177	94,61834	x	x
26	Water, cooling,	Crudo	l	x	112	x	x	x
27	Water, river	Crudo	cm3	x	x	916,08334	x	x
28	Water, unspecified	Crudo	l	x	26,4	x	x	x

**Tabla 62. Inventario Ambiental durante el Transporte de PEBD a cuatro localidades.**

<b>Título:</b>		Comparación entre 4 ciudades de distribución de Pellets PEBD, modelo base					
<b>Método:</b>		IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+					
<b>Compartimento:</b>		Todos los compartimentos					
<b>Indicador:</b>		Inventario					
No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Barranquilla	Bogotá	Cali	Medellín
1	Carbon dioxide	Aire	kg	30,365294	35,69284	44,6162	28,25691
2	Carbon dioxide, fossil	Aire	g	2,2413793	2,241379	2,24138	2,241379
3	Carbon monoxide	Aire	mg	1,0832084	1,083208	1,08321	1,083208
4	Carbon monoxide, fossil	Aire	kg	1,0128	0,7632	1,1408	0,5488
5	Dinitrogen monoxide	Aire	µg	23,350825	23,35083	23,3508	23,35083
6	Heat, waste	Aire	MJ	949,509	715,509	1069,51	514,509
7	Methane	Aire	µg	299,10045	299,1005	299,1	299,1005
8	Methane, fossil	Aire	g	14,52599	15,57101	20,1211	12,13214
9	Nitrogen oxides	Aire	kg	2,4163654	1,825489	2,72551	1,313604
10	Particulates, < 10 um	Aire	µg	124,06297	124,063	124,063	124,063
11	Particulates, < 2.5 um	Aire	g	189,9	143,1	213,9	102,9
12	Sulfur dioxide	Aire	g	126,6	95,4	142,6	68,6
13	Sulfur oxides	Aire	g	21,924522	25,77112	32,214	20,40222
14	VOC, volatile organic compounds	Aire	µg	101,57421	101,5742	101,574	101,5742
15	Calcium, ion	Agua	mg	199,755	199,755	199,755	199,755
16	Chloride	Agua	mg	137,5	137,5	137,5	137,5
17	Magnesium	Agua	mg	119,995	119,995	119,995	119,995
18	Nitrate	Agua	mg	309,815	309,815	309,815	309,815
19	Phosphate	Agua	mg	451,25	451,25	451,25	451,25
20	Potassium, ion	Agua	mg	194,975	194,975	194,975	194,975
21	Sodium, ion	Agua	mg	112,2	112,2	112,2	112,2
22	Sulfate	Agua	mg	479,525	479,525	479,525	479,525
23	Waste, final, inert	Desecho	g	24,11684	28,3481	35,4352	22,44231

**Tabla 63. Inventario Ambiental durante la transformación del PEBD (Extrusión Cliente).**

<b>Título:</b>		Analizando 1 p (Extrusión Cliente), modelo base		
<b>Método:</b>		IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+		
<b>Compartimento:</b>		Todos los compartimentos		
<b>Indicador:</b>		Inventario		
<b>Modo relativo:</b>		No		
No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Blown film/ LDPE
1	Water, cooling, unspecified	Crudo	m3	1,48
2	Carbon dioxide, fossil	Aire	ton	1,1946609
3	Carbon monoxide	Aire	g	577,35285
4	Dinitrogen monoxide	Aire	g	12,446049
5	Heat, waste	Aire	MJ	2,38
6	Methane	Aire	g	159,42131
7	Nitrogen oxides	Aire	kg	1,7300608
8	Ozone	Aire	mg	326,58653
9	Particulates, < 10 um	Aire	g	66,12588
10	Particulates, < 2.5 um	Aire	g	26,879432
11	Sulfur oxides	Aire	g	65,126999
12	VOC, volatile organic	Aire	g	66,853529
13	Oils, unspecified	Agua	ng	619,5
14	Oil waste	Desecho	mg	1,47

## Anexo H. Comparación de Proceso de PEBD en la Literatura.

El Análisis de Ciclo de Vida comparativo en la producción de 1 tonelada de Polietileno de baja densidad de origen fósil (producido en el Medio Oriente Arabia Saudita y utilizado en Europa) es el modelo de estudio PEBD-03, creado en la base de datos según la información encontrada en literatura, para luego ser comparado con el modelo obtenido a lo largo de este estudio. (Christin Liptow Tillman, 2009)

A continuación se presentan los consumos máxicos y energéticos del proceso:

**Tabla 64. Consumo energético, steam cracking de nafta, Suecia**

Compuesto	Valor	Unidad
Naphta	1,2	Kg
Fuel	4,9	MJ
Electricity	4,9	MJ
Etileno	1	Kg

**Tabla 65. Consumo energético, Polimerización de etileno, Suecia**

Compuesto	Valor	Unidad
Etileno	1	Kg
Fuel	0,3	MJ
Electricity	13,4	MJ
PEBD	1	Kg

Los Impactos generados en los procesos de cracking de nafta y polimerización de etileno, fueron determinados según factores de emisión de la literatura (Christin Liptow Tillman, 2009).

**Tabla 66. Contaminantes generados en procesos de cracking y polimerización, Suecia.**

Contaminante	Unidad (g contaminante/kg Etileno)	Unidad (g contaminante/kg Polietileno)
CO <sub>2</sub>	919	765,1
NO <sub>x</sub>	1,343	3,176
SO <sub>2</sub>	1,9384	4,596
HC	0,12	0,3
CO	0,0216	0,054
CH <sub>4</sub>	22975,0048	19127,512
N <sub>2</sub> O	275700,027	229530,054
NMVOG	0,12	0,3

Adicional a los impactos generados en las etapas de inclusión, se tuvieron en cuenta los contaminantes generados por el consumo de la electricidad promedio europea, como se registra en la siguiente tabla.

**Tabla 67. Contaminantes generados por 1 MJ de energía eléctrica en Suecia.**

Contaminante	Unidad (g/MJ)
CO2	217,5
Nox	0,8
SO2	0,2
CO	0,03
CH4	0,9
N2O	0,00058
NMVOG	0,0084
HC	1,90E-03

Los factores de emisión utilizados para el cálculo de contaminantes se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 68. Factores de Emisión, modelos de literatura.**

Contaminant	GWP 100 (kg CO2/kg emisión)	POCPs (kg Ethyle/kg emisión)	Acidific (kg SO2/kg emisión)	Eutrophicat (kg PO4eq/kg emisión)
CO2	1	0	0	0
NOx	0	0	0,7	0,13
SO2	0	0,048	1	0
HFC	0	0	0	0
HC	0	0,15	0	0
CO	0	0,027	0	0
CH4	25	0,006	0	0
N2O	300	0	0	0,27
NMVOG	0	0,15	0	0

## Anexo I. Inventario Ciclo de Vida, Comparación de Procesos de PEBD en la Literatura.

Tabla 69. Inventario Ambiental, Procesos de producción PEBD, modelo Europeo.

Título:		Analizando 1 p (PEBD), Modelo Contexto Europeo (Suecia)					
Método:		IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+					
Indicador:		Inventario					
No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Steam Cracking Ethylene	Ethylene Polymerization	Extrusión Cliente	Pellets Road Transport
1	Benzene	Aire	mg	x	x	x	11,448
2	Benzo(a)pyrene	Aire	µg	x	x	x	57,24
3	BOD5, Biological Oxygen D	Agua	mg	x	x	x	64,4275
4	Cadmium	Aire	µg	x	x	x	620,1
5	Calcium, ion	Agua	mg	x	x	x	199,755
6	Carbon dioxide	Aire	kg	x	x	x	39,720682
7	Carbon dioxide, fossil	Aire	kg	3050,5	3744,85	3480	0,002241379
8	Carbon monoxide	Aire	kg	0,294	0,411	0,48	0,091661923
9	Chloride	Agua	mg	x	x	x	266,355
10	COD, Chemical Oxygen D	Agua	mg	x	x	x	128,855
11	Dinitrogen monoxide	Aire	g	5,684	7,946	9,28	5,0562234
12	Energy, from uranium	Crudo	GJ	4,9	x	x	x
13	Ethene	Aire	kg	0,8	2	x	x
14	Heat, waste	Aire	MJ	x	x	2380	519,939
15	Hydrocarbons, chlorinated	Aire	g	18,62	26,03	30,4	x
16	Hydrocarbons, unspecified	Aire	g	x	x	x	37,36795
17	Hydrocarbons, unspecified	Agua	mg	x	x	x	257,71
18	Hydrogen	Agua	mg	x	x	x	386,565
19	Hydrogen chloride	Aire	mg	x	x	x	64,4275
20	Lead	Aire	mg	x	x	x	4,02588
21	Magnesium	Agua	mg	x	x	x	119,995
22	Metallic ions, unspecified	Agua	mg	x	x	x	64,4275
23	Metals, unspecified	Aire	mg	x	x	x	12,8855
24	Methane	Crudo	kg	500	x	x	x
25	Methane	Aire	kg	8,82	12,33	14,4	0,001374059
26	Nitrate	Agua	mg	x	x	x	309,815
27	Nitrogen oxides	Aire	kg	7,84	10,96	12,8	0,5067392
28	Nitrogen, total	Agua	mg	x	x	x	12,8855
29	NMVOC, non-methane v	Aire	g	82,32	115,08	134,4	43,5024
30	Ozone	Aire	g	x	x	3,24	x
31	Particulates, < 10 um	Aire	µg	x	x	x	124,06297
32	Particulates, < 10 um	Aire	g	x	x	x	24,0408
33	Particulates, < 2.5 um	Aire	g	x	x	113	x
34	Particulates, SPM	Aire	g	x	x	x	4,38107
35	Phosphate	Aire	g	100	200	x	x
36	Phosphate	Agua	mg	x	x	x	451,25
37	Potassium, ion	Agua	mg	x	x	x	194,975
38	Slags	Desecho	g	x	x	x	32,21375
39	Sodium, ion	Agua	mg	x	x	x	112,2
40	Sulfate	Agua	mg	x	x	x	479,525
41	Sulfur dioxide	Aire	kg	1,9	4,5	x	x
42	Sulfur oxides	Aire	kg	1,96	2,74	3,2	0,052958822
43	VOC, volatile organic c	Aire	kg	x	x	12,714195	1,01574E-07

44	Waste, final, inert	Desecho	g	x	x	x	28,3481
45	Water, cooling, un	Crudo	m3	x	x	43,7	x
46	Water, river	Crudo	l	x	913,89	x	x
47	Zinc	Aire	g	x	x	x	1,7172

**Tabla 70. Inventario Ambiental, Procesos de producción PEBD, modelo hidroeléctrico.**

<b>Título:</b>		Analizando 1 p (PEBD) Energía Hidráulica					
<b>Método:</b>		IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+					
<b>Indicador:</b>		Inventario					
<b>No</b>	<b>Sustancia</b>	<b>Compartimento</b>	<b>Unidad</b>	<b>Steam Cracking Ethylene</b>	<b>Ethylene Polymerization</b>	<b>Extrusión Cliente</b>	<b>Pellets Road Transport</b>
1	Acetic acid	Aire	g	x	3,102	x	x
2	Acetic acid	Agua	g	x	1,2408	x	x
3	BOD5, Biological Oxygen D	Agua	g	x	31,592	x	x
4	Calcium, ion	Agua	g	641,66874	x	x	0,199755
5	Carbon dioxide	Aire	kg	155,10496	124,97393	135,18011	35,693089
6	Carbon dioxide, fossil	Aire	kg	442,82774	287,31488	x	x
7	Carbon dioxide, in air	Crudo	kg	1,42968	0,00171024	x	x
8	Carbon dioxide, land transf	Aire	kg	102,61806	82,683248	89,435698	0,000167796
9	Carbon monoxide	Aire	g	278,83791	190,27982	55,645467	0,0001044
10	Carbon monoxide, fossil	Aire	g	x	x	x	763,2
11	Chloride	Agua	g	441,68833	x	x	0,1375
12	Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	Crudo	kg	9,7422206	7,8496754	8,4907308	1,59E-05
13	COD, Chemical Oxygen D	Agua	g	x	31,592	x	x
14	Dinitrogen monoxide	Aire	g	4,6874728	3,0518113	0,066198918	1,24E-07
15	DOC, Dissolved Organic Carbon	Agua	g	x	9,264	x	x
16	Energy, from hydro power	Crudo	MJ	3687,7332	2971,3461	3214,0054	0,00603
17	Energy, kinetic (in wind),	Crudo	MJ	5,5040794	4,4348449	4,797023	9,00E-06
18	Ethene	Aire	g	x	53,970637	x	x
19	Gas, natural, 30.3 MJ per kg,	Crudo	kg	50,087123	40,357088	43,65291	8,19E-05
20	Heat, waste	Aire	MJ	1506,5051	708,91631	2,5766779	715,509
21	Hydrocarbons, unspecified	Aire	g	16,732402	13,481928	14,58295	2,74E-05
22	Hydrogen, in ground	Crudo	g	759,924	x	x	x
23	Magnesium	Agua	g	385,45739	x	x	0,119995
24	Methane	Crudo	kg	215,97403	1,527	x	x
25	Methane	Aire	g	59,247298	38,422412	x	x
26	Methane, biogenic	Aire	kg	1,6787442	1,3526277	1,463092	2,75E-06
27	Methane, fossil	Aire	g	x	x	x	15,57101
28	Nitrate	Agua	g	995,21214	x	x	0,309815
29	Nitrogen oxides	Aire	kg	1,1263818	0,80600166	0,42194615	1,8254863
30	Nitrogen, in air	Crudo	g	208,868	x	x	x
31	Occupation, water bodies, a	Crudo	m2a	34,521586	27,815347	30,086929	5,64E-05
32	Oil waste	Desecho	g	x	122,892	0,00147	x
33	Oils, unspecified	Agua	mg	x	51,7902	0,0006195	x
34	Oxygen, in air	Crudo	g	351,076	x	x	x
35	Ozone	Aire	mg	x	x	326,58653	x
36	Particulates, < 10 um	Aire	g	25,429773	15,90371	x	x
37	Particulates, < 2.5 um	Aire	g	x	0,17400662	26,879432	143,1
38	Particulates, > 10 um	Aire	g	x	296,86124	x	x

39	Particulates, SPM	Aire	g	12,274097		9,8897041	10,697361	2,01E-05
40	Phosphate	Agua	kg	1,4495408	x			0,00045125
41	Potassium, ion	Agua	g	626,31405	x			0,194975
42	Sodium, ion	Agua	g	360,41768	x			0,1122
43	Soot	Aire	g	85,753558		69,094883	74,737619	0,00014022
44	Sulfate	Agua	kg	1,540368	x			0,000479525
45	Sulfur dioxide	Aire	g		x			95,4
46	Sulfur oxides	Aire	kg	2,9061909		0,14489742	0,13978525	0,025771262
47	TOC, Total Organic Carbon	Agua	g		x	9,264		
48	Transformation, from water	Crudo	dm2	22,566726		18,182864	19,667794	3,69E-05
49	Transformation, to unknown	Crudo	dm2	22,566726		18,182864	19,667794	3,69E-05
50	VOC, volatile organic c	Aire	g	20,125757		14,596665	12,714213	
51	Waste, final, inert	Desecho	g		x			28,3481
52	water	Aire	mg		x	43,2		
53	Water, cooling, surface	Crudo	ton	820,76052		379,01334		
54	Water, cooling, unspecified	Crudo	m3		x	0,112	1,48	
55	Water, river	Crudo	cm3		x	916,08334		
56	Water, unspecified natural	Crudo	l		x	26,4		

**Tabla 71. Contribución Ambiental, Ponderación única, comparación de modelos.**

roceso	Puntuación Única por cada Proceso (Pt)		
	Modelo Base Termoeléctrico	Modelo Hidroeléctrico	Modelo Contexto Europeo
Energía Eléctrica Suecia	x	x	1,3652279
Ethylene (Base Naphta) 3	x	x	0,30588886
Polyethylene, LDPE, Pellets, Suecia 2	x	x	0,11286111
Truck 40t ETH U (Suecia)	x	x	0,012418123
Extrusion, plastic film/Suecia	x	x	0,012311185
Diesel I (Suecia)	x	x	0,001035225
UOP II	0,007379183	0,007379183	x
UOP I	0,012534177	0,012534177	x
Transport, tractor (Pellets LDPE)	0,03851567	0,03851567	x
TBPP,H	x	1,08E-05	x
TBPP	1,08E-05	x	x
TBPA-H	x	3,18E-06	x
TBPA	3,18E-06	x	x
Reciclo Polietileno	0,000506402	0,000506402	x
Polyethylene, LDPE, Pellets	3,34E-05	3,34E-05	x
Poliethylene Recycle	0,000423328	0,000423328	x
Oil,H	x	1,41E-07	x
Oil	1,41E-07	x	x
Gas Rico Etano/Etileno	0,041188997	0,041188997	x
Extrusion, Blown film/ LDPE; H	x	0,002654158	x
Extrusion, Blown film/ LDPE	0,002654158	x	x
Energía Térmica	0,090184955	0,090184955	x
Energía Eléctrica Mix	x	0,12166408	x
Energía Eléctrica	0,45336373	x	x
Emission Ethylene	0,021219404	0,021219404	x
Diesel (LDPE)	0,003981694	0,003981694	x
Carga de Etano	0,010098214	0,010098214	x
Butane refinery	-	-	x

**Anexo J. Inventario Ciclo de Vida, Comparación de Procesos de PEBD según el tipo de energía eléctrica en Sur América.**

**Tabla 72. Contribución de Impactos, Comparación Procesos de producción PEBD según tipo de energía eléctrica.**

<b>Título:</b>		Comparación de Modelos , Tipo Energía		
<b>Método:</b>		IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+		
<b>No</b>	<b>Proceso</b>	<b>Unidad</b>	<b>PEBD-Hidroeléctrico</b>	<b>PEBD-Termoeléctrico</b>
1	Carga de Etano	Pt	1,0098E-02	1,0098E-02
2	Diesel (LDPE)	Pt	3,9817E-03	3,9817E-03
3	Emission Ethylene	Pt	2,1219E-02	2,1219E-02
4	Energía Eléctrica	Pt	-	4,5336E-01
5	Energía Eléctrica Mix	Pt	1,2166E-01	-
6	Energía Térmica	Pt	9,0185E-02	9,0185E-02
7	Extrusion, Blown film/ LDPE	Pt	-	2,6542E-03
8	Extrusion, Blown film/ LDPE; H	Pt	2,6542E-03	-
9	Gas Rico Etano/Etileno	Pt	4,1189E-02	4,1189E-02
10	Oil	Pt	-	1,4072E-07
11	Oil,H	Pt	1,4072E-07	-
12	Poliethylene Recycle	Pt	4,2333E-04	4,2333E-04
13	Polyethylene, LDPE, Pellets	Pt	3,3384E-05	3,3384E-05
14	Reciclo Polietileno	Pt	5,0640E-04	5,0640E-04
15	TBPA	Pt	-	3,1754E-06
16	TBPA-H	Pt	3,1754E-06	-
17	TBPP	Pt	-	1,0796E-05
18	TBPP,H	Pt	1,0796E-05	-
19	Transport, tractor (Pellets LDPE)	Pt	3,8516E-02	3,8516E-02
20	UOP I	Pt	1,2534E-02	1,2534E-02
21	UOP II	Pt	7,3792E-03	7,3792E-03

**Tabla 73. Inventario Ambiental, Comparación Procesos de producción PEBD, según tipo de energía eléctrica.**

<b>Título:</b>		Comparando PEBD-Hidroeléctrico Y PEBD-Termoeléctrico			
<b>Método:</b>		IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+			
<b>Indicador:</b>		Inventario			
<b>No</b>	<b>Sustancia</b>	<b>Compartimento</b>	<b>Unidad</b>	<b>PEBD-Hidroeléctrico</b>	<b>PEBD-Termoeléctrico</b>
1	Acetic acid	Aire	g	3,102	3,102
2	Acetic acid	Agua	g	1,241	1,241
3	BOD5, Biological Oxygen Demand	Agua	g	31,592	31,592
4	Calcium, ion	Agua	g	641,869	641,869
5	Carbon dioxide	Aire	kg	450,952	35,693
6	Carbon dioxide, fossil	Aire	kg	730,143	4400,017
7	Carbon dioxide, in air	Crudo	kg	1,431	1,431
8	Carbon dioxide, land transformation	Aire	kg	274,737	-
9	Carbon monoxide	Aire	kg	0,525	2,127
10	Carbon monoxide, fossil	Aire	g	763,200	763,200
11	Chloride	Agua	g	441,826	441,826
12	Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	Crudo	kg	26,083	-
13	COD, Chemical Oxygen Demand	Agua	g	31,592	31,592
14	Dinitrogen monoxide	Aire	g	7,805	45,835

15	DOC, Dissolved Organic Carbon	Agua	g	9,264	9,264
16	Energy, from hydro power	Crudo	GJ	9,873	-
17	Energy, kinetic (in wind), converted	Crudo	MJ	14,736	-
18	Ethene	Aire	g	53,971	53,971
19	Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	Crudo	kg	134,097	-
20	Heat, waste	Aire	GJ	2,934	2,933
21	Hydrocarbons, unspecified	Aire	g	44,797	-
22	Hydrogen, in ground	Crudo	g	759,924	759,924
23	Magnesium	Agua	g	385,577	385,577
24	Methane	Crudo	kg	217,501	217,501
25	Methane	Aire	g	97,670	587,395
26	Methane, biogenic	Aire	kg	4,494	-
27	Methane, fossil	Aire	g	15,571	15,571
28	Nitrate	Agua	g	995,522	995,522
29	Nitrogen oxides	Aire	kg	4,180	8,198
30	Nitrogen, in air	Crudo	g	208,868	208,868
31	Occupation, water bodies, artificial	Crudo	m2a	92,424	-
32	Oil waste	Desecho	g	122,893	122,893
33	Oils, unspecified	Agua	mg	51,791	51,791
34	Oxygen, in air	Crudo	g	351,076	351,076
35	Ozone	Aire	mg	326,587	326,587
36	Particulates, < 10 um	Aire	g	41,333	244,465
37	Particulates, < 2.5 um	Aire	g	170,153	170,153
38	Particulates, > 10 um	Aire	g	296,861	296,861
39	Particulates, SPM	Aire	g	32,861	-
40	Phosphate	Agua	kg	1,450	1,450
41	Potassium, ion	Agua	g	626,509	626,509
42	Sodium, ion	Agua	g	360,530	360,530
43	Soot	Aire	g	229,586	-
44	Sulfate	Agua	kg	1,541	1,541
45	Sulfur dioxide	Aire	g	95,400	95,400
46	Sulfur oxides	Aire	kg	3,217	2,987
47	TOC, Total Organic Carbon	Agua	g	9,264	9,264
48	Transformation, from water bodies, artificial	Crudo	dm2	60,417	-
49	Transformation, to unknown	Crudo	dm2	60,417	-
50	VOC, volatile organic compounds	Aire	g	47,437	213,747
51	Waste, final, inert	Desecho	g	28,348	28,348
52	water	Aire	mg	43,200	43,200
53	Water, cooling, surface	Crudo	kton	1,200	1,200
54	Water, cooling, unspecified natural origin/m3	Crudo	m3	1,592	1,592
55	Water, river	Crudo	cm3	916,083	916,083
56	Water, unspecified natural origin/m3	Crudo	l	26,400	26,400