



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTADO DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

**“DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DEL
PROCESO DE REGENERACIÓN DE CATALIZADOR AGOTADO
FCC USADO EN PIRÓLISIS CATALÍTICA DE PLÁSTICOS”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTORA: GINA FRANSHESKA VERA HIDALGO

DIRECTOR: Ing. PAUL GUSTAVO PALMAY PAREDES, PhD

Riobamba – Ecuador

2023

©2023, Gina Fransheska Vera Hidalgo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Gina Fransheska Vera Hidalgo, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 24 de agosto de 2023

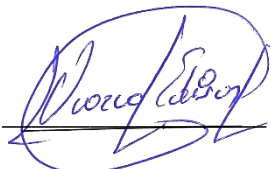
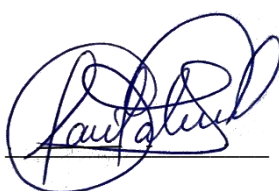
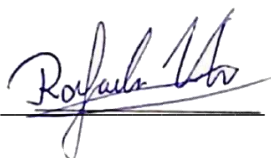


Gina Fransheska Vera Hidalgo

C.I. 131224309-8

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación: Tipo: Proyecto de Investigación, “**DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DEL PROCESO DE REGENERACIÓN DE CATALIZADOR AGOTADO FCC USADO EN PIRÓLISIS CATALÍTICA DE PLÁSTICOS**”, realizado por la señorita **GINA FRANSHESKA VERA HIDALGO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Edison Geovanny Orozco Valencia PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-08-24
Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes DIRECTOR/A DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2023-08-24
Ing. Maria Rafaela Viteri Uzcategui ASESORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2023-08-24

DEDICATORIA

Con mucho amor y respeto dedico el presente Trabajo de Titulación a mis padres Martha y Pascual por el esfuerzo y sacrificio que han realizado al apoyarme a cumplir esta meta, sin ellos este logro no hubiera sido posible. A mis hermanos Alan y Ainara por darme aliento en momentos complicados y por recordar mis virtudes para no decaer. A mis amigos Paola, Lizeth, Gio, Gregory, Marly, Susana que a pesar de las circunstancias han sido incondicional en toda esta trayectoria universitaria.

Fransheska

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia por ser el pilar fundamental en esta etapa y por el apoyo emocional y económico incondicional brindado durante todos estos años. Al Ing. Paul Palmay e Ing. Rafaela Viteri por la guía y paciencia durante el desarrollo del trabajo de titulación. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrirme sus puertas e impartir grandes conocimientos para ser una buena profesional.

Fransheska

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1.	MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	4
1.1.	Antecedentes de la investigación.....	4
1.2.	Marco teórico	4
1.2.1.	<i>Huella de carbono</i>	<i>4</i>
1.2.2.	<i>Métodos para el cálculo de la huella de carbono</i>	<i>5</i>
1.2.3.	<i>Clasificación de los plásticos</i>	<i>9</i>
1.2.4.	<i>Pirolisis de plásticos</i>	<i>10</i>
1.2.5.	<i>Pirolisis catalítica de plásticos</i>	<i>11</i>
1.2.6.	<i>Factores que intervienen en la pirolisis</i>	<i>11</i>
1.2.7.	<i>Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC)</i>	<i>13</i>
1.2.8.	<i>Catalizador de craqueo catalítico</i>	<i>14</i>
1.2.9.	<i>Componentes típicos del catalizador de craqueo catalítico</i>	<i>15</i>
1.2.10.	<i>Características físicas del catalizador FCC</i>	<i>16</i>
1.2.11.	<i>Propiedades catalíticas del catalizador FCC.....</i>	<i>17</i>
1.2.12.	<i>Catalizador agotado FCC</i>	<i>18</i>
1.2.13.	<i>Proceso de regeneración de catalizador agotado FCC.....</i>	<i>19</i>

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	20
2.1.	Objetivos	20
2.1.1.	<i>Objetivo General</i>	<i>20</i>
2.1.2.	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>20</i>
2.2.	Enfoque de la investigación.....	20

2.3.	Nivel de la investigación	20
2.4.	Tipo de estudio	21
2.5.	Métodos y técnicas	21
2.5.1.	<i>Métodos</i>	21
2.5.2.	<i>Técnicas</i>	22
2.6.	Población de estudio	22
2.7.	Tamaño de muestra	22
2.8.	Técnica de recolección de datos	23
2.8.1.	<i>Pérdidas en el proceso de regeneración</i>	23
2.8.2.	<i>Huella de carbono del proceso de regeneración</i>	23
2.8.2.1.	<i>Definición de los límites de la organización:</i>	24
2.8.2.2.	<i>Definición de límites operativos:</i>	24
2.8.2.3.	<i>Fase de cuantificación:</i>	27
2.8.2.4.	<i>Realización del informe de los resultados obtenidos:</i>	29

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
3.1.	Tamaños de muestras	30
3.1.1.	<i>Cantidad de catalizador agotado para cantidad de residuos plásticos diarios</i>	30
3.1.2.	<i>Cantidad de catalizador agotado para residuos de polipropileno diarios</i>	31
3.2.	Huella de Carbono del proceso de regeneración	31
3.2.1.	<i>Definición de los límites operativos</i>	31
3.2.1.1.	<i>Equipos seleccionados para regenerar 1.8 toneladas de catalizador agotado al día</i>	31
3.2.1.2.	<i>Equipos seleccionados para regenerar 325.25 kg de catalizador agotado al día</i>	36
3.2.2.	<i>Fase de cuantificación</i>	41
3.2.2.1.	<i>Consumo energético de los equipos</i>	41
3.2.2.2.	<i>Factor de emisión</i>	45
3.2.2.3.	<i>Huella de carbono</i>	45
	CONCLUSIONES	50
	RECOMENDACIONES	51

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1:	Producción de residuos de plásticos en la ciudad de Riobamba.....	22
Tabla 2-2:	Porcentaje de pérdida en cada etapa del proceso de regeneración	23
Tabla 2-3:	Tiempo de operación por equipo	27
Tabla 3-1:	Cantidad de catalizador regenerado a emplear de acuerdo a la cantidad de residuos plásticos	30
Tabla 3-2:	Cantidad de catalizador agotado que ingresa a cada equipo para 1713.88kg/d de catalizador regenerado	30
Tabla 3-3:	Cantidad de catalizador agotado que ingresa a cada equipo para 308.5 kg/d de catalizador regenerado	31
Tabla 3-4:	Características del horno para el secado de 1.8 toneladas de catalizador.....	32
Tabla 3-5:	Características del agitador para 20 m ³ de etanol.....	33
Tabla 3-6:	Características del filtro rotatorio al vacío para 20 m ³ /h	33
Tabla 3-7:	Características del horno para el calcinado de 1.8 toneladas de catalizador	34
Tabla 3-8:	Características de la columna de destilación para 20m ³	35
Tabla 3-9:	Características del reboiler para 20m ³	35
Tabla 3-10:	Cantidad de aire para la selección del blower de 1.8 tonelada de catalizador al día	35
Tabla 3-11:	Características del blower para 10 m ³ /h de flujo de etanol.....	36
Tabla 3-12:	Características del horno para el secado de 325.25 kg de catalizador agotado al día	37
Tabla 3-13:	Características del agitador para 4m ³	37
Tabla 3-14:	Características del filtro rotatorio al vacío para 4m ³ /h	38
Tabla 3-15:	Características del horno para calcinado de 325.25 kg de catalizador al día.....	39
Tabla 3-16:	Característica de la columna de destilación para 4m ³	39
Tabla 3-17:	Característica del reboiler para 4m ³	39
Tabla 3-18:	Cantidad de aire requerido para la selección del blower de 325.25 kg de catalizador al día.....	40
Tabla 3-19:	Características del blower para 4m ³ /h	40
Tabla 3-20:	Consumo energético total con reciclado de etanol para 1.8 tonelada al día	41
Tabla 3-21:	Consumo energético total con reciclado de etanol para 325.25 kg de catalizador al día.....	42
Tabla 3-22:	Consumo energético total de los dos casos con reciclado de etanol.....	43

Tabla 3-23: Huella de carbono total con reciclado de etanol para 1.8 tonelada de catalizador al día.....	45
Tabla 3-24: Huella de carbono total con reciclado de etanol para 325.25 kg de catalizador al día	46
Tabla 3-25: Huella de carbono total de los dos casos con reciclado de etanol	46

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: Pasos para identificar y calcular las emisiones de GEI.....	6
Ilustración 1-2: Relación entre el alcance 3 y el estándar de ciclo de vida de un producto	7
Ilustración 1-3: Análisis de ciclo de vida	8
Ilustración 1-4: Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC).....	14
Ilustración 2-1: Diagrama de procesos	21
Ilustración 2-2: Proceso de regeneración a nivel de laboratorio	24
Ilustración 3-1: Diagrama comparativo del consumo energético total con reciclado de etanol	43
Ilustración 3-2: Diagrama comparativo de la huella de carbono total con reciclado de etanol.	47
Ilustración 3-3: Huella de carbono de regeneración de catalizador y de pirólisis de plásticos .	48

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Cantidad inicial	23
Ecuación 2-2: Flujo de aire	26
Ecuación 2-3: Consumo energético	28
Ecuación 2-4: Consumo sin reciclado de etanol	28
Ecuación 2-5: Consumo con reciclado de etanol	28
Ecuación 2-6: Factor de emisión.....	28
Ecuación 2-7: Huella de carbono	29
Ecuación 2-8: Huella de carbono sin reciclado.....	29
Ecuación 2-9: Huella de carbono con reciclado.....	29

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** CÁLCULO DE CANTIDAD DE CATALIZADOR AGOTADO A LA ENTRADA DE CADA EQUIPO DEL PROCESO DE REGENERACIÓN PARA 1713.88 kg DE CATALIZADOR REGENERADO
- ANEXO B:** CÁLCULO DE CANTIDAD DE CATALIZADOR AGOTADO A LA ENTRADA DE CADA EQUIPO DEL PROCESO DE REGENERACIÓN PARA 308.5 kg DE CATALIZADOR REGENERADO
- ANEXO C:** CÁLCULO DE CAUDAL DE AIRE REQUERIDO PARA LA SELECCIÓN DEL BLOWER
- ANEXO D:** CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS EQUIPOS PARA 1.8 TONELADAS DE CATALIZADOR AL DÍA
- ANEXO E:** CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS EQUIPOS PARA 325kg DE CATALIZADOR AL DÍA
- ANEXO F:** CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO PARA 1.8 TONELADAS DE CATALIZADOR AL DÍA
- ANEXO G:** CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO PARA 325kg DE CATALIZADOR AL DÍA
- ANEXO H:** GUIA PARA CALCULAR LA HUELLA DE CARBONO
- ANEXO I:** DIAGRAMA DE PROCESO PARA REGENERACIÓN DE 1.8 TON. DE CATALIZADOR
- ANEXO J:** DIAGRAMA DE PROCESO PARA LA REGENERACIÓN DE 325kg DE CATALIZADOR AGOTADO

RESUMEN

La implementación de la técnica de pirólisis catalítica para tratar la problemática de sobreacumulación de residuos plásticos requiere del uso de catalizadores para mejorar el proceso; sin embargo, la regeneración de catalizadores agotados es un procedimiento complejo que emite gases contaminantes a la atmósfera; por tanto, el objetivo de la presente investigación fue determinar la huella de carbono del proceso de regeneración de catalizador agotado FCC (Craqueo Catalítico Fluidizado) usado en pirólisis catalítica de plásticos. La metodología empleada fue netamente investigativa cuyos datos parten de experimentaciones previas a menor escala; se inició con la determinación de dos tamaños de muestra de catalizador, posteriormente se seleccionó los equipos necesarios para el pretratamiento, tratamiento químico, tratamiento térmico y reciclado de etanol debidamente escalados acorde al tamaño de muestra, luego se efectuaron los respectivos cálculos para determinar el consumo energético de cada equipo, el cual fue multiplicado por el factor de emisión para obtener la huella de carbono individual y tras la suma de estos valores se obtuvo la huella de carbono global (HdC) del proceso. Tras la metodología aplicada se determinó que en la regeneración de 1713.88 kg/d de catalizador se reportó un consumo energético total de 4350.92 kWh lo que deriva una huella de carbono integral de 1996.79 kg CO₂; mientras que para la regeneración de los residuos de polipropileno es necesario regenerar 325.25 kg de catalizador, proceso que incluye un consumo energético global de 683.67 kWh permitiendo establecer una HdC total de 268.06 kg CO₂. En tal virtud, se concluye que el proceso de regeneración de catalizador para la pirólisis de plásticos refleja una HdC elevada en comparación con el reciclaje mecánico debido a las altas temperaturas con las que se trabaja; sin embargo, este tratamiento permite la recuperación de materiales para producir productos con un valor agregado.

Palabras clave: <HUELLA DE CARBONO>, <PIRÓLISIS CATALÍTICA>, <CATALIZADOR AGOTADO FCC>, <REGENERACIÓN>, <PLÁSTICOS>.

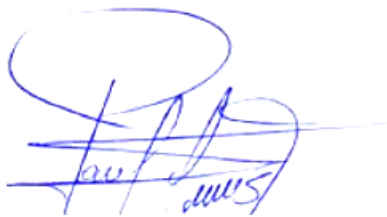
1761-DBRA-UPT-2023



SUMMARY

The implementation of the catalytic pyrolysis technique to face the problem related to overaccumulation of plastic waste requires the use of catalysts to improve the process; however, the regeneration of used catalysts is a complex procedure that emits polluting gases into the atmosphere; therefore, the aim of this research was to determine the carbon footprint in the regeneration process of used catalyst FCC (Fluidized Catalytic Cracking), useful in catalytic pyrolysis of plastics. The methodology used was research-based and the data were obtained from previous small-scale experiments; it started with the determination of two catalyst sample sizes, then the necessary equipment was selected for pretreatment, chemical treatment, thermal treatment and properly scaled ethanol recycling according to the sample size; then, the corresponding calculations were carried out to determine the energy consumption of each equipment, which was multiplied by the emission factor in order to obtain the individual carbon footprint and after the sum of these values, the global carbon footprint (CoF) of the process was obtained. After applying the methodology, it was determined that during the regeneration of 1713.88 kg/d of catalyst, a total energy consumption of 4350.92 kWh was reported, this originates an integral carbon footprint of 1996.79 kg CO₂; while for the regeneration of polypropylene waste it is necessary to regenerate 325.25 kg of catalyst, a process that includes an overall energy consumption of 683.67 kWh allowing to establish a total HdC of 268.06 kg CO₂. Thus, it is concluded that the catalyst regeneration process for the pyrolysis of plastics reflects a high HdC compared to mechanical recycling due to the high temperatures with which it works; however, this treatment allows the recovery of materials to produce added value products.

Keywords: <CARBON FOOTPRINT>, <CATALYTIC PYROLYSIS>, <USED CATALYZER FCC>, <REGENERATION>, <PLASTICS>.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Paul Rolando Armas Pesántez', with a large, stylized initial 'P' at the top.

Lic. Paul Rolando Armas Pesántez Mgs.

060328987-7

INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios la industria del plástico ha tenido gran aceptación por los seres humanos y a medida que transcurrió el tiempo se convirtieron en los materiales más utilizados por el hombre puesto que reemplazaron a los convencionales como madera, metales o cerámicas debido a la cantidad de aplicaciones que estos pueden tener; por tal motivo, se ha comprobado un crecimiento del 10 % anual en la producción de plástico a nivel mundial (Mancheno et al., 2016, p. 61). Los plásticos son materiales altamente utilizados debido al bajo costo económico, versatilidad, resistencia y peso ligero; no obstante, otra característica es la dificultad de biodegradación que estos presentan pues una vez concluido su vida útil son dispuestos en rellenos sanitarios o botaderos sin tratamiento alguno, razón por la cual da origen a una problemática ambiental por la sobreacumulación de los residuos plásticos que afecta a los ecosistemas e incluso pueden llegar hasta la cadena trófica causando desequilibrios en los seres vivos (Zambrano, 2022, p. 1).

Dada la magnitud del problema medioambiental, se ha intensificado la búsqueda de soluciones mediante el reciclaje mecánico que consiste en el aprovechamiento de los desechos plásticos para la elaboración de nuevos o a través de técnicas de reciclaje químico que se convierten en una fuente de materia prima de valiosos compuestos orgánicos (Elgegren et al., 2012, p. 106); sin embargo, el reciclaje mecánico no es muy aceptable puesto que no puede ser aplicado a todo tipo de plástico ya que en su mayoría están contaminados con metales, papel u otros polímeros, además en lo posterior terminarán siendo nuevamente desechos incorporándose de nuevo al problema inicial; en tanto que, el reciclaje químico representa una alternativa viable para el tratamiento de plásticos aún en combinación con otros materiales y a partir de ellos obtener productos de interés (Palmy, 2022, p. 29).

La pirólisis catalítica representa un proceso de degradación térmica de ciertos materiales empleando temperaturas elevadas, en ausencia de oxígeno y con ayuda de un catalizador, generalmente para esta metodología, la materia prima está constituida por residuos de carácter industrial, biomasa e incluso residuos sólidos urbanos; estos últimos representan una fuente potencial para la obtención de combustibles líquidos. Los catalizadores desempeñan fundamental dentro de la pirólisis catalítica ya que disminuyen la energía de activación del proceso, estos coadyuvantes pueden ser catalizadores ácidos zeolíticos, catalizadores de alúmina, catalizadores de silicatos de aluminio o catalizadores de zeolitos modificados (Ramos et al., 2023, p. 3).

Por otro lado, el desarrollo a gran escala de la actividad petrolera en el país como una de las principales fuentes económicas ha incentivado al uso de catalizadores para el proceso de craqueo catalítico de moléculas para la obtención de productos de alta calidad con menor gasto de energía

y tiempo; no obstante, el uso continuo de estos catalizadores agota la efectividad de su función siendo imprescindible procesos de regeneración que devuelvan su capacidad, es así que en Ecuador para la refinación de 43.83 millones de barriles ingresados a la unidad FCC se ha utilizado entre 5 a 10% de catalizador produciendo alrededor de 4383000 g de catalizador desactivado que necesita ser regenerado, consiste en efectuar tratamientos químicos y térmicos a fin de eliminar impurezas que impiden su funcionamiento (Andrade, 2020, p. 2). Así también, de acuerdo a (Torres C. y Torres, 2010: p. 36) el craqueo catalítico es un proceso imprescindible en la industria petroquímica para la fabricación de combustibles de calidad extra a partir de la estructura molecular de ciertos hidrocarburos haciendo indispensable el uso de catalizadores de zeolita tipo Y, mismo que experimentara un proceso de desgaste e inactivación modificando su comportamiento y efectividad, es por ello que resulta importante la sustitución o regeneración de este catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC).

Los catalizadores regenerados pueden ser utilizados en diferentes procesos entre ellos, en la pirólisis catalítica de plásticos que constituye una técnica de reciclaje químico que permite la descomposición térmica de polímeros haciendo uso de una cantidad limitada de oxígeno o en ausencia del mismo a temperaturas comprendidas entre 300 y 900°C, este proceso tiene por objetivo alcanzar la conversión eficiente de macromoléculas en moléculas pequeñas de parafina que a su vez podrían ser materia prima para la obtención de combustibles, es así que, al emplear los catalizadores regenerados de zeolita en los procesos de degradación de plásticos produce fracciones líquidas más livianas y con características más adecuadas para ser usada en motores e incluso disminuyen la energía total consumida (Amar et al., 2019, p. 307). Sin embargo, el proceso de pirólisis catalítica de plásticos genera gran cantidad de gases altamente contaminantes derivando otra problemática ambiental, por tanto, como una medida para determinar la viabilidad de aplicación de esta técnica de reciclaje químico se calcula la huella de carbono que representa una herramienta para cuantificar los gases de efecto invernadero emanados a la atmósfera derivados de este proceso, el indicador huella de carbono expresa las emisiones totales de los gases de efecto invernadero en toneladas equivalentes en relación a todo el ciclo de vida del producto desde la materia prima utilizada hasta la disposición final del producto terminado; en algunos casos esta herramienta se limita a considerar exclusivamente al CO₂ como gas indicador, mientras que, de acuerdo al Protocolo de Kioto los gases a considerar son dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), hidrofluorocarbonados (HFC), perfluorados (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (Espíndola y Valderrama, 2012, p. 166).

Por los argumentos expuestos se plantea el presente trabajo de titulación que tiene por objetivo determinar la huella de carbono del proceso de regeneración de catalizador agotado FCC usado

en pirolisis catalítica de plásticos y así establecer si es viable o no la aplicación de esta técnica como una solución a la problemática ambiental mencionada.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes de la investigación

Ecuador es considerado un país petrolero, puesto a que el ingreso por la actividad petrolera supera el 10% del Producto Interno Bruto (PIB), produciendo aproximadamente 487000 barriles de petróleo diarios, y, 43.83 millones de barriles trimestralmente (Tur, 2023, p. 15), los cuales son ingresados a la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC) para su posterior transformación en productos de mayor valor. El empleo de catalizadores en el proceso es de suma importancia, ya que este acelera dicho proceso, en promedio se emplea entre 5% - 10% de catalizador en peso de petróleo a refinar, es decir, alrededor de 4383000 g de catalizador, que una vez cumple con su vida útil son desechados causando así, un problema ambiental a nivel de almacenamiento de los mismos. No obstante, existen procesos para la regeneración de estos catalizadores los cuales involucran la adición de químicos y calor, de tal manera que active su función y pueda ser empleado en otros procesos como la pirólisis de plásticos. Sin embargo, este proceso de regeneración o reactivación de los catalizadores también genera una cierta contaminación al medio ambiente, en cuanto a la cantidad de energía requerida y, sobre todo, a la cantidad de gases emanados a la atmosfera.

La huella de carbono es una herramienta para la cuantificación de los gases de efecto invernadero (GEI) producidos por una empresa, producto o servicio, este término, en los últimos años ha tomado gran importancia en las empresas, puesto que ayuda a reducir costos, principalmente, de consumo de electricidad y combustible, también, identifica la fuente de mayor emanación de GEI, además de mostrar públicamente un compromiso con el medio ambiente (Espíndola y Valderrama, 2012, p. 166).

1.2. Marco teórico

1.2.1. Huella de carbono

La Huella de Carbono (HdC) es un concepto que ha tomado auge en los últimos años debido al creciente problema de cambio climático, sin embargo, dicho concepto aparece desde la década de los 90's, desde la cual ha ido evolucionando y con ello, su forma de cálculo, conllevando a metodologías muy disimiles (Valderrama et al., 2011, p. 2). Este término no es más que una herramienta

para la cuantificación de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se emiten a la atmosfera por las distintas actividades antropogénicas (Espíndola et al., 2012, p. 5), en donde deben incluir todas las emisiones directas e indirectas generadas por un proceso, actividad, producto o servicio en todo su ciclo de vida.

Los GEI tomados en cuenta para el cálculo de dicha huella son los establecidos en el Protocolo de Kioto, los cuales son: dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), hidrocarburos perfluorados (PFC), hidrofluorocarbonos (HFC), y, hexafluoruro de azufre (SF₆) junto con el trifluoruro de nitrógeno (NF₃) el cual fue incorporado en el año 2012 (Pandey et al., 2011, p. 9).

1.2.2. Métodos para el cálculo de la huella de carbono

En la actualidad las metodologías de cálculo de huella de carbono parten de una misma base para obtener sus datos, mediante el análisis de ciclo de vida. Una vez se estudia el ciclo de vida, desde la obtención de las materias primas hasta la disposición final, cada uno de los métodos toma un rumbo diferente en cuanto al enfoque, alcance, escala y unidad. Los métodos actuales de cálculo son Protocolo de Gases Efecto Invernadero, Balance de Carbono, Especificaciones Públicamente Disponibles (PAS 2050) y, Método Compuesto de las Cuentas Contables (Pandey et al., 2011, p. 15).

- **Protocolo de Gases Efecto Invernadero**

El Protocolo de Gases Efecto Invernadero (GHG) es una iniciativa lanzada en 1998 para el desarrollo sustentable, conformada por 170 empresas internacionales. El objetivo principal fue fomentar una extensa adopción a nivel internacional creando estándares de contabilidad, dichos estándares están basados en una guía para aquellas empresas que deseen medir y reportar las emisiones de GEI que generan y, otra guía para medir la disminución las emisiones de GEI en proyectos específicos (World Business Council for Sustainable Development, World Resources Institute y Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004, p. 70)

El protocolo categoriza las emisiones en tres alcances: el alcance 1 está relacionado con las emisiones directas, el alcance 2 asociadas a las emisiones por el empleo de electricidad, calor y refrigeración, y, el alcance 3 relacionada a las emisiones indirecta las cuales no se encuentran en control de la organización. Además, dicho protocolo presenta algunos estándares específicos, tales como el estándar corporativo, para ciudades, para proyectos, para objetivos de mitigación, para productos, para políticas y acciones y, para cadena de valor corporativo (Jancovici, 2022).

La relevancia, integridad, coherencia, transparencia y precisión son los principios que le da confiabilidad al protocolo, debido a que en la relevancia consideran varios factores como la estructura organizacional, límites operacionales y el contexto de la empresa; en la integridad el cuantificador documenta, revela y justifica cualquier distinción específica; en cuanto a la coherencia, se incorpora metodologías comparables para darle un seguimiento a las emisiones en el transcurso del tiempo; la transparencia garantiza que se documenten los aspectos de una forma objetiva, clara y coherente; y, la precisión de la información proporcionada garantiza que los usuarios tomen decisiones (Jancovici, 2022).

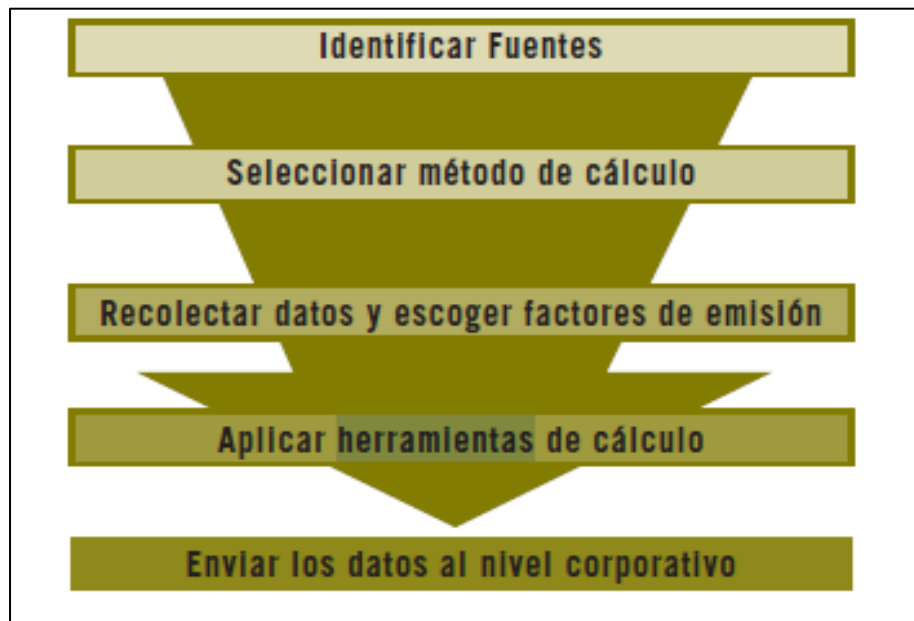


Ilustración 1-1: Pasos para identificar y calcular las emisiones de GEI

Fuente: (World Business Council for Sustainable Development, World Resources Institute y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004, p. 51)

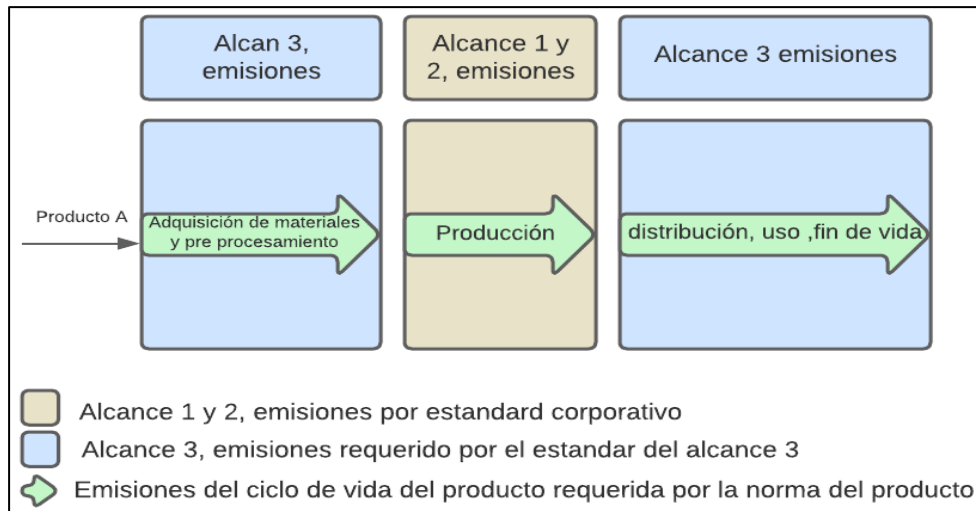


Ilustración 1-2: Relación alcance 3 y estándar de ciclo de vida de un producto

Fuente: (World Resources Institute y World Business Council for Sustainable Development, 2011, p. 9)

- Balance de Carbono

El método de balance de carbono fue elaborada con el objetivo de transformar datos que son relativos a las actividades productivas, como el consumo de energía, cantidad de camiones, distancias conducidas en emisiones, entre otras, en emisiones mediante la utilización de factores de emisión (Jancovici, 2022). Dicho método clasifica las emisiones dependiendo de la fuente y, además, las contabiliza en emisiones directas e indirectas que se relacionan con las actividades industriales, empresariales, entidades administrativas (Monteros, 2021).

- Especificaciones Públicamente Disponibles, PAS 2050

Especificaciones Públicamente Disponibles (PAS 2050) es un método desarrollado en el año 2007 por el Instituto Británico de Estandarización (BSI) en colaboración con el Consorcio de Carbono y el Departamento para el Ambiente, la Alimentación y Asuntos rurales (DEFRA). Este método aplica la norma ISO 14040 y 14067 para el análisis de ciclo de vida y huella de carbono para productos, respectivamente (Espíndola et al., 2012, p. 10). En primer lugar, esta metodología toma en cuenta las fuentes de emisiones de un grupo de actividades para evaluar el ciclo de vida de bienes y servicios. Dicho grupo de actividades que se toman en consideración son las emisiones de la generación de electricidad adquirida; emisiones de la extracción y producción de materiales y actividades adquiridas; emisiones de la combustión de calderas, hornos, vehículos, es decir de dominio o control de la empresa; y, las emisiones que son originadas por consecuencia de las actividades de la empresa pero se generan en fuentes que no son dominio de la empresa (Miguel, 2011, p. 22).

La ISO 14040, análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta que ayuda a identificar, cuantificar y caracterizar los aspectos e impactos potenciales relacionados con cada una de las etapas de un producto (Rodríguez, 2003, p. 1), es decir, la obtención de la materia prima, la fabricación del producto, el uso y, su disposición final (Larrahondo, 2012, p. 5) esto lo realiza a través de la recopilación de un inventario de entradas y salidas de un sistema (Rodríguez, 2003, p. 7).

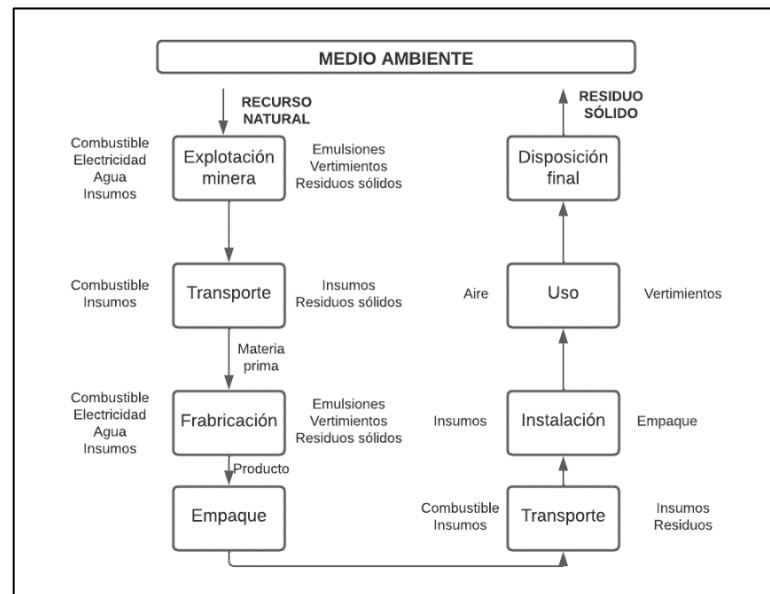


Ilustración 1-3: Análisis de ciclo de vida

Fuente: (Rodríguez, 2003, p. 7)

- Método de las Cuentas Contables (MC3)

El método de las cuentas contables tiene clara su delimitación en cuanto al cálculo de las emisiones generadas, ya que, no involucra el uso o el transporte del producto por terceros, ajenos a la organización (Espíndola et al., 2012, p. 11).

Se enumeran ocho ventajas del presente método:

1.- Alcance organizacional con delimitación clara, debido a que en su cálculo no involucra el uso del producto por parte de terceros (Doménech et al., 2010, p. 4).

2.- La organización incorpora un enfoque mixto, es decir, de abajo hacia arriba para aquellos productos de entrada, y, de arriba hacia abajo para aquellos productos de salida, lo que conlleva a que haya una distribución de la huella entre los productos que ofrece la organización. Además, como es fácil de emplear permite que el análisis de ciclo de vida sea completo y preciso,

permitiendo así, un cálculo simultaneo de productos y en organizaciones (Doménech et al., 2010, p. 4).

3.- Al delimitar el alcance operacional, incorporando todos los consumos de la organización, permite que sea comparable (Doménech et al., 2010, p. 4).

4.- Relaciona el aspecto ambiental y económico, ya que, los datos son obtenidos a partir de las cuentas contables de la organización (Doménech et al., 2010, p. 4).

5.- Incorpora la huella ecológica, dándole un valor agregado al cálculo de HdC, ya que, para algunos rangos de consumo no sería posible convertir a CO₂ (Doménech et al., 2010, p. 4).

6.- Es objetiva, simple, transparente y de fácil uso. Simple porque para su cálculo se basa en factores de emisión; transparente porque se incorporan base de datos oficiales y reconocidos; y, fácil uso porque únicamente se incorporan los datos que solicita la herramienta (Doménech et al., 2010, p. 4).

7.- Capacidad de retroalimentación de la herramienta (Doménech et al., 2010, p. 4).

1.2.3. Clasificación de los plásticos

Los plásticos o también denominados polímeros, son moléculas orgánicas constituidas por varias cadenas de hidrocarburos, la unión de dichas cadenas se realiza a través de una reacción química denominada polimerización, las cuales se unen mediante enlaces covalentes (Palmy, 2022, p. 30).

Los polímeros se pueden clasificar de acuerdo a su estructura molecular, a su estado físico, al tipo de degradación (Bustamante, 2003, p. 2). Cuando se habla de estructura de los polímeros se debe abarcar tanto la estructura química como la física, ya que, hace referencia a la construcción de la molécula de manera individual y, la forma de ordenamiento de una molécula con respecto a otra (Beltran et al., 2012, p. 264). Es así, que se agrupan en termoplásticos, termoestables y elastómeros.

- **Termoplásticos**

La estructura de los termoplásticos es lineal no entrelazados, lo que le confiere la propiedad de transformarse en fluidos y, con la presencia de calor mantenerse en una forma determinada, este proceso se puede repetir de manera innumerable, es decir, que estos plásticos son ideales para el reciclaje (Beltran et al., 2012, p. 264).

Dentro de los termoplásticos se encuentran los polietilenos, poliésteres saturados, poliestirenos polivinilos y, polipropilenos (Armadillo, 2021, p. 3).

- Termoestables

La estructura de los termoestables es entrelazada, es decir, no se funden ni son solubles, por lo que, para poder darle forma se parte de un punto intermedio de plásticos termoendurecibles que todavía se puede fundir. Es así que el proceso de polimerización y entrecruzamiento se dan simultáneamente en el proceso de darle forma (Beltran et al., 2012, p. 264). Entre los materiales termoestables se encuentran las resinas epoxi, resinas de poliéster, aminas, fenoles (Armadillo, 2021, p. 3).

- Elastómeros

La estructura de los elastómeros es entrelazada, pero con pocos enlaces, lo que permite que los plásticos posean una gran elasticidad recuperando su forma inicial (Beltran et al., 2012, p. 264).

Entre los materiales elastoméricos se encuentran el neopreno, silicona, polibutadieno, gomas (Armadillo, 2021, p. 4).

1.2.4. Pirolisis de plásticos

La pirólisis es un procedimiento de reciclaje químico de plásticos el cual involucra temperaturas elevadas e incorporación de catalizadores sólidos. El proceso de pirólisis se basa en la ruptura de las macromoléculas de los plásticos para formar moléculas de menor peso molecular en ausencia de oxígeno (Palmay, 2022, p. 30). Dicho proceso abarca tres etapas, la administración de la materia prima, la modificación de la masa y, la extracción y separación de los productos, obteniéndose así, una fracción sólida, líquida y gaseosa (Klug, 2012, p. 10). La cantidad de las diferentes fracciones obtenidas va a depender de algunos factores en el proceso, los cuales son la temperatura, tiempo de residencia, materia prima, velocidad, tiempo de calentamiento, diseño de reactor, tipo de catalizador, entre otras (Palmay, 2022, p. 36).

1.2.5. Pirolisis catalítica de plásticos

La pirólisis catalítica se enfoca en la ruptura de los enlaces de las moléculas de elevado peso molecular a través de la incorporación de catalizadores a su proceso, de manera tal que disminuye la energía de activación y, por ende la temperatura de trabajo (Navarro, 2007, p. 60). Las reacciones de pirólisis se llevan a cabo en los sitios activos de los catalizadores, los cuales suelen ser ácidos y con un elevado contenido de sílice y alúmina (Palmy, 2022, p. 53). Como se indica anteriormente el proceso no requiere de temperaturas muy elevadas para la degradación de los productos, es un proceso más rápido y los productos obtenidos son de mayor calidad, sin embargo, se encuentra limitada para los plásticos poliolefinicos por la presencia de cloro, nitrógeno y otras cargas inorgánicas presentes en sus polímeros, ya que causan una inactivación de los sitios activos de los catalizadores (Navarro, 2007, p. 60).

1.2.6. Factores que intervienen en la pirolisis

El proceso de pirólisis da como resultado una fracción líquida, sólida y gaseosa. La cantidad que se genere de cada una de las mismas va a depender de una serie de factores que influyen en el proceso. La fracción líquida está formada por hidrocarburos alifáticos de elevado peso molecular (C5-C30), la sólida se da como consecuencia de reacciones terciarias y, la gaseosa se encuentra formada por hidrocarburos ligeros (C1-C4) (Mendoza, 2015, p. 78). Los principales factores que intervienen en el proceso son los siguientes:

- Tipo de reactor

El diseño del reactor es el encargado de determinar el comportamiento y el rendimiento de las reacciones, sin un diseño adecuado el rendimiento no será óptimo. En el proceso se puede emplear distintos tipos de reactores tales como el reactor discontinuo, de lecho fluidizado, spouted bed, de tornillo, extrusor, de tanque agitado, de lecho fijo, autoclave, de esferas y riser (Newalkar et al., 2014, p. 3), sin embargo, el reactor de lecho fluidizado es el más empleado en este proceso, ya que, además de evaluar la influencia de la actividad catalítica no requiere de tiempos de residencia muy largos constituyendo a un aumento en el rendimiento de olefinas y evitando su descomposición a parafinas además de dar un régimen isoterma. Este reactor aplica un régimen de fluidización rápida empujando las partículas sólidas a un ciclón en donde tiene lugar la separación de los productos gaseosos, que, a su vez, pueden ser recogidos, en cambio, las partículas sólidas regresan al reactor (Mendoza, 2015, p. 79).

- Temperatura

Se considera que la temperatura es el factor de mayor importancia en el proceso, debido a que de esta depende la proporción de las fracciones obtenidas. A una temperatura muy baja no se daría las reacciones de descomposición, obteniéndose menor cantidad de productos, mientras que, a temperaturas demasiadas elevadas ocasiona un aumento en las vibraciones de las moléculas evaporándose las mismas y, ocasionando rupturas terminas, en donde la fracción líquida disminuye (Mendoza, 2015, p. 79).

(Mastral et al., 2002, p. 6) en su investigación sobre la influencia de la temperatura y el tiempo de residencia en pirolisis del polietileno en un lecho fluidizado, mencionan que a temperaturas por debajo de los 730°C además de gases, se forman ceras sólidas mismas que a medida que aumenta la temperatura se transforman en líquido, por el contrario, a temperaturas superiores a 730°C la formación de sólidos es insignificante toma mayor relevancia la producción de fracciones gaseosas y líquidas.

- Velocidad de calentamiento

Se define como velocidad de calentamiento al tiempo requerido por las partículas para calentarse desde una temperatura ambiente hasta la temperatura de descomposición. El tipo de reacción de pirolisis va a depender de este factor, la pirólisis flash favorece a la obtención de la fracción líquida y gaseosa esta se da a velocidades superiores de 250°C/s (Mendoza, 2015, p. 79).

- Tiempo de residencia

Tiempo en el que los compuestos volátiles generados se encuentran en el interior del reactor, en el cual se pueden producir reacciones secundarias y terciarias variando la distribución del producto y la composición gaseosa. Cuando el tiempo de residencia es elevado se produce un aumento en el rendimiento de las fracciones gaseosas y sólidas, por el contrario, disminuye el rendimiento de la fracción líquida, corroborando lo mencionado (Hernández, 2007, p. 18) en su estudio acerca de la relación del tiempo de residencia con el rendimiento de las fracciones, concluye que al aumentar el factor mencionado en la pirolisis del polietileno las reacciones de los compuestos volátiles transforman los compuestos C4-C7 en C1-C3. Además, pueden formar compuestos aromáticos que dan lugar a la formación de sólidos carbonos.

- Tamaño del producto

El tamaño del producto es importante ya que, para que haya un mayor rendimiento en cuanto a las fracciones obtenidas debe haber un calentamiento uniforme en el interior del reactor, mientras el tamaño sea menor se disminuye la cantidad de sólidos producidos y aumenta la cantidad de líquidos (Mendoza, 2015, p. 79).

- Tipo de catalizador

El tipo de catalizador empleado en el proceso catalítico de plásticos juega un papel importante ya que, fracciona los compuestos con una menor energía de activación. El factor importante a resaltar en los catalizadores es la acidez y la superficie porosa, dependiendo de la acidez del catalizador se va a generar ciertas cantidades de productos, es así que, si la acidez es excesivamente elevada los productos gaseosos van a aumentar y los productos líquidos disminuyen (Palmy, 2022, p. 54). entre los catalizadores empleados en el proceso se destacan tres tipos, catalizadores sílice-alúmina, zeolitas y catalizadores de craqueo catalítico.

1.2.7. Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC)

La unidad de craqueo catalítico se emplea para transformar los hidrocarburos complejos en productos más simples empleando catalizadores. Fue diseñada para que exista una recirculación continua de catalizador entre el reactor y el regenerador (Gonzalez 2014). Esta unidad consta de un regenerador, un reactor, una torre fraccionadora y un horno precalentador (Mercado, Delgado y Delgado 2009).

- Reactor

En esta unidad se ponen en contacto los hidrocarburos de cadenas largas y complejas, que son previamente calentados en un horno, con el catalizador produciendo reacciones para obtener productos de mayor valor, en dichas reacciones se produce coque, el cual es el encargado de desactivar los sitios ácidos del catalizador, es decir, inactivando su función. Las temperaturas de trabajo oscilan entre 480-540°C (Gonzalez, 2014, p. 40).

- Torre fraccionadora

La torre de fraccionamiento, como su nombre lo indica es la encargada de separar los productos obtenidos del reactor. En la parte superior de la torre se mantendrán los productos de menor peso, y, en la parte inferior se alojan los productos de mayor densidad (Mercado et al., 2009, p. 2).

- Regenerador

En el regenerador se da una combustión del coque que se encuentra adherido en la superficie del catalizador de manera que se reactive su actividad. La cantidad de coque presente en el catalizador va a depender de las condiciones de operación y la alimentación en el reactor, generalmente el catalizador que ingresa al regenerador contiene un porcentaje aproximado de coque de 0.8-2.5, el cual a través de temperaturas elevadas se elimina hasta un porcentaje menor de 0.1 (Gary et al., 1980, p. 102).

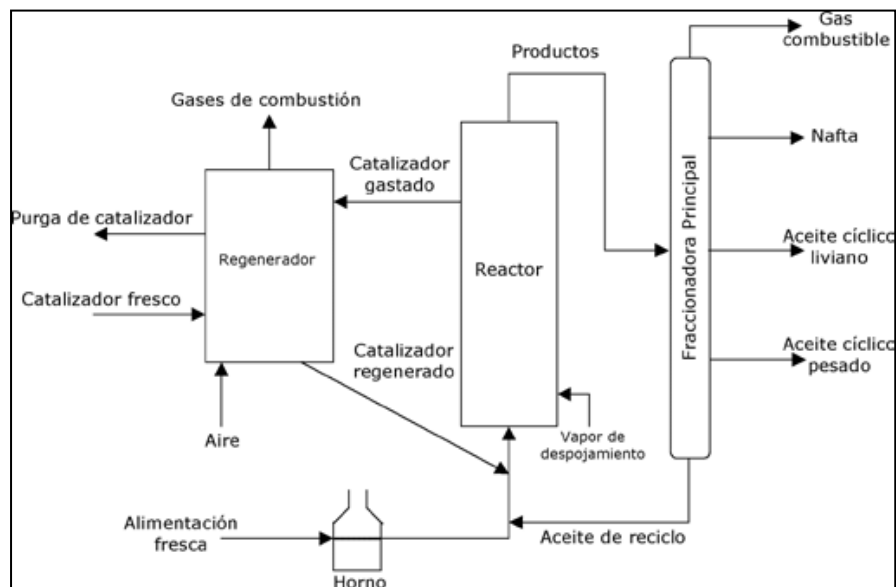


Ilustración 1-4: Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC)

Fuente: (Mercado et al., 2009, p. 3)

1.2.8. Catalizador de craqueo catalítico

El catalizador de craqueo catalítico (FCC) está constituido de cristales de zeolita Y – aluminosilicato – esparcido en una matriz de alúmina o, sílice-alúmina y partículas de arcillas. La zeolita es la responsable que se de las reacciones de craqueo en el catalizador, dichas zeolitas contiene una red cristalina denominadas tierras raras las cuales proporcionan estabilidad

estructural del catalizador, aumentando su vida útil, además de incrementar la acidez (Maidel et al., 2019, p. 7).

1.2.9. Componentes típicos del catalizador de craqueo catalítico

El tamaño de los catalizadores de craqueo catalítico oscila entre los 75-100 μm , estos se componen de 35% de zeolitas, 60% de la matriz y, 5% de aditivos, aproximadamente.

- Zeolita

La zeolita es el componente activo del catalizador, esta se encuentra formada por tetraedros consecutivos con átomos de silicio y aniones de aluminio en su centro, presenta una configuración tridimensional ocasionando que los poros de la misma se comuniquen entre ellos y así, aumentar su actividad, este componente se encuentra distribuido por la matriz del catalizador (Gary et al., 1980, p. 104).

- Matriz de catalizador

La matriz se compone de arcillas y geles sintéticos de aluminosilicato en el cual se adhiere la zeolita y los aditivos. Los catalizadores presentan la matriz activa, inerte y sintética.

La matriz activa está compuesta principalmente por alúmina, posee una estructura porosa la cual facilita la dispersión de hidrocarburos por el catalizador, además de prevenir la unión de metales cuando es expuesta a condiciones adversas. Su principal ventaja es el contenido de olefinas, la cual incrementa el octanaje de la nafta (Mosquera 2016).

La matriz inerte se constituye por arcilla natural o modificada, esta cumple con la función de soportar a la zeolita y a los aditivos, además de proporcionar firmeza mecánica y una fluidización eficiente (Mosquera, 2016, p. 11).

La matriz sintética es la encargada de proporcionar la característica aglutinadora, es decir, sirve como pegamento entre la zeolita y las matrices mencionadas anteriormente. Por dicha capacidad puede limitar la entrada a los poros y puede dejar frágil al catalizador (Mosquera, 2016, p. 11).

- Aditivos

La función de los aditivos es aumentar el rendimiento del proceso, los más empleados son el monóxido de carbono (CO), aditivos de sulfuros (SO_x) y, pasivadores de metales. El monóxido de carbono evita que las temperaturas se eleven mucho, principalmente se utiliza en el regenerador ayudando a la combustión de monóxido de carbono a dióxido de carbono. En cuanto a los aditivos de sulfuros se utilizan para disminuir la contaminación generada en el regenerador, debido a que el coque contiene azufre que al entrar en contacto con calor forman compuestos SO_x que son muy contaminantes para la atmosfera, es así que dichos aditivos cumplen la función de adsorber y enlazarse con los SO_x del coque. Por otro lado, se encuentran los pasivadores de metales su función principal es controlar los metales contaminantes tales como el níquel, sodio y vanadio, los cuales se introducen en los sitios activos de los catalizadores eliminando su función, los pasivadores empleados son el antimonio y bismuto (Mosquera, 2016, p. 12).

1.2.10. Características físicas del catalizador FCC

- Superficie específica (AE)

La superficie específica del catalizador está relacionada con la cantidad de alúmina y zeolita presente en la matriz activa, la variación de estas es directamente proporcional con el rendimiento catalítico del catalizador, es decir, si hay un aumento en la cantidad de alúmina y zeolita, por ende habrá un aumento en la actividad catalítica y viceversa (Mitchell et al., 1993, p. 3).

- Estabilidad

La función es mantener la actividad y selectividad durante el tiempo, está relacionada con la cantidad de silicio y aluminio y con el contenido de tierras raras, los principales factores que afectan la estabilidad de los catalizadores son la contaminación de los mismos y las temperaturas elevadas (Mitchell et al., 1993, p. 3).

- Diámetro y volumen de los poros

Es una característica importante a considerar, debido a que guía la selectividad del catalizador, si el tamaño muy reducido va a tender a obstruir los poros, por el contrario, si los poros son muy grandes la superficie específica será baja para el volumen reduciendo la eficacia (Mitchell et al., 1993, p. 4).

- Resistencia al desgaste

Las principales causas de desgaste de las partículas se deben a las grandes velocidades de flujo y a las elevadas temperaturas empleadas, esta propiedad está relacionada con la dureza, por lo que el contenido de zeolita, la dispersión dentro de la matriz, la disminución del tamaño de los cristales y la cantidad de matriz inerte y sintética son factores a considerar para conseguir una buena resistencia, el cual el rango óptimo varía entre 3-7 (Mitchell et al., 1993, p. 4).

- Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es importante, debido a que afecta a la fluidización y a la resistencia al desgaste, ya que un tamaño de partícula grande (superior a 80 μ m) afecta a la quema de coque por una distribución desigual de las partículas del catalizador, por el contrario, un tamaño de partícula muy pequeña (inferior a 20 μ m) provoca una pérdida del catalizador (Mitchell et al., 1993, p. 4).

- Densidad aparente

Si la densidad es elevada no se da una fluidización adecuada, por el contrario, si la densidad es muy baja causa pérdida del catalizador. El rango óptimo de densidad aparente oscila entre 0.9 – 1.05 g/cm³. La densidad aparente de un catalizador agotado oscila entre 0.96 – 1.28 g/cm³ cuando se encuentra suelto y cuando se encuentra compactado oscila entre 1.20 – 1.40 g/cm³ (Mitchell et al., 1993, p. 4).

1.2.11. Propiedades catalíticas del catalizador FCC

- Actividad

Esta propiedad mide la destreza que presenta un catalizador para realizar el rompimiento de los enlaces de los hidrocarburos, su unidad de medida es la microactividad, la cual debe oscilar en un rango de 55-75 para que el catalizador realice una actividad óptima. Además, presenta una relación entre el rendimiento del producto y la cantidad de catalizador empleado. La acidez, la alúmina presente en la matriz, la superficie específica y la relación molar de sílice y aluminio son las propiedades que influyen en dicha característica catalítica (Mosquera, 2016, p. 17). Esta actividad disminuye cuando existe un envenenamiento de algunos metales como el vanadio, sodio y nitrógeno básico, destruyendo la cristalinidad de la zeolita y neutralizando sus sitios ácidos (Mosquera, 2016, p. 17).

- Selectividad

La selectividad cuantifica la relación existente entre la cantidad de productos deseados con la cantidad de coque y gas metano producido, gracias a esta propiedad el catalizador obtiene una alta producción de nafta. Dicha propiedad depende de las zeolitas presentes en el catalizador, la cual se ve afectada por el envenenamiento de los sitios activos por metales como el cobre, vanadio, níquel y hierro obstruyendo el paso de los hidrocarburos, es por ello que entre los principales componentes se encuentran los aditivos, los cuales evitan que el envenenamiento por los metales se retarde (Mosquera, 2016, p. 17).

1.2.12. Catalizador agotado FCC

Se denomina catalizador agotado cuando el mismo pierde sus características catalíticas como es la actividad y la selectividad, esto se lleva a cabo por el ensuciamiento, la sinterización y por el envenenamiento de los metales presentes en los hidrocarburos a catalizar, estos metales se adhieren a los sitios ácidos del catalizador disminuyendo así la producción de nafta y aumentando la producción de coque. Sin embargo, actualmente se han desarrollado procesos para que dichos catalizadores agotados sean regenerados y que su vida útil se alargue (Mosquera, 2016, p. 18).

- Envenenamiento

Se da por la adsorción de reactivos, productos o impurezas sobre la matriz del catalizador, obstruyendo el acceso de los hidrocarburos. El envenenamiento puede ser reversible o irreversible, cuando es reversible cambiando las condiciones de operación el catalizador adquiere nuevamente sus propiedades catalíticas, si, por el contrario, requiere de un cambio de catalizador es irreversible. Los metales presentes en los hidrocarburos a catalizar son la principal razón del envenenamiento, entre los cuales el sodio es el más perjudicial, debido a que cambia la selectividad del catalizador (Carrera, 2013, p. 41).

- Ensuciamiento

El ensuciamiento del catalizador se da por la presencia de coque, mientras más contenido de coque se encuentre en la superficie del catalizador la desactivación se dificultara más (Carrera, 2013, p. 41).

- Sinterización

También denominada envejecimiento, la cual ocasiona una pérdida de la superficie activa del catalizador debido a la larga exposición de temperaturas elevadas, por la presencia de los metales o, por el cierre del poro del catalizador (Carrera, 2013, p. 41).

1.2.13. Proceso de regeneración de catalizador agotado FCC

Para que se dé el proceso de regeneración de catalizadores agotados FCC, los mismos deben someterse a un secado completo para proceder con el tratamiento químico y térmico.

- Tratamiento químico

Este tratamiento es el encargado de la remoción de óxidos de azufre presentes en la matriz del catalizador, empleando una agitación continua del catalizador con un solvente, este puede ser etanol, tolueno, benceno o disulfuro de carbono, de los cuales el disulfuro de carbono es el que presenta mayor rendimiento, sin embargo, el benceno y el etanol también presenta un rendimiento bueno (Guanquiza, 2018, p. 68). Cuando se finaliza la agitación se procede a la filtración al vacío para finalmente secar el sólido que se adquiere de la misma (Palmay, 2022, p. 101).

- Tratamiento térmico

En esta etapa el producto obtenido del tratamiento químico previo se somete a calcinación con diferentes temperaturas elevadas (Palmay, 2022, p. 101).

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Objetivos

2.1.1. *Objetivo General*

- Determinar la huella de carbono del proceso de regeneración de catalizador agotado FCC usado en pirólisis catalíticas de plásticos.

2.1.2. *Objetivos Específicos*

- Determinar las condiciones de operación para el proceso de regeneración de catalizador.
- Estimar el consumo energético del proceso de regeneración para uso en pirólisis.
- Analizar el tratamiento de mayor contribución a la huella de carbono en el proceso de regeneración de catalizador agotado FCC.

2.2. Enfoque de la investigación

El enfoque de este trabajo es de tipo cuantitativo, ya que mediante la recopilación de datos de investigaciones que lo anteceden se cuantifican las emisiones de CO₂ a la atmósfera de tal manera que se verifica si el proceso causa impactos ambientales considerables permitiendo establecer la viabilidad de aplicación de dicho proceso.

2.3. Nivel de la investigación

La investigación es de nivel aplicativo puesto que se desea conocer cuan viable es el proceso de regeneración de catalizadores agotados de craqueo catalítico midiendo la huella de carbono que genera este procedimiento. Además, es descriptivo ya que se basa en la recolección de información presentada en investigaciones anteriores para cuantificar con la mayor precisión posible el indicador de la huella de carbono empleando la metodología del ministerio para la transición ecológica española.

2.4. Tipo de estudio

El presente trabajo de titulación es de tipo investigativo puesto que se recopilan datos e información de investigaciones previas para desarrollar el cálculo de la huella de carbono, analizando así, las variables y el consumo eléctrico de cada una de las fases del proceso de regeneración de catalizador agotado lo que permite determinar si dicho proceso es amigable con el medio ambiente.

2.5. Métodos y técnicas

2.5.1. Métodos

El método de la investigación es deductivo, puesto que de información general se obtienen datos específicos, es decir, de las operaciones unitarias del proceso de regeneración se obtienen datos particulares de cada una de las fases para poder determinar la huella de carbono.

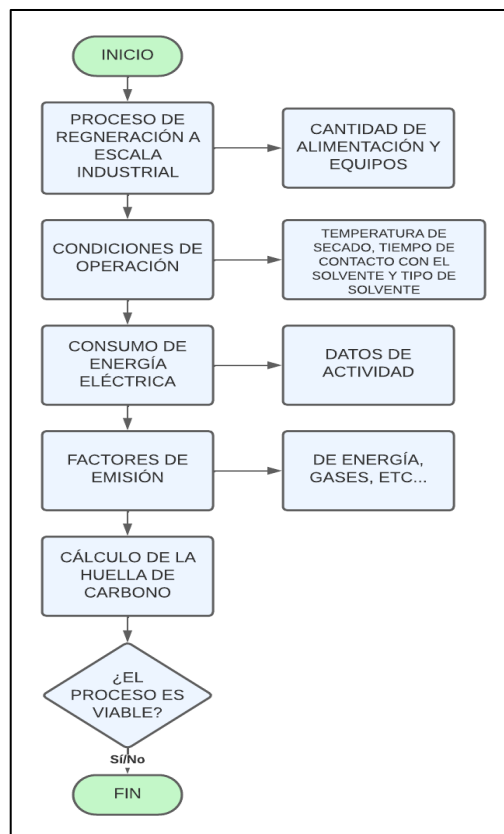


Ilustración 2-1: Diagrama de procesos

Realizado por: Vera G., 2023

2.5.2. Técnicas

La técnica empleada para el proyecto fue la normativa española desarrollada por el Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente, la cual se basa en las normas ISO 14064-1.

2.6. Población de estudio

La población de estudio de la investigación es el proceso de regeneración de catalizador agotado de craqueo catalítico a nivel industrial.

2.7. Tamaño de muestra

En la ciudad de Riobamba se ha determinado una producción per cápita de residuos de 0.6 kg/hab.d alcanzando una totalidad de 158400 kg/d, de los cuales el 10.82% corresponde a residuos plásticos y de este porcentaje el 18% son de polipropileno como se describe en la Tabla 2-1; por otro lado, según Andrade (2020, p. 15) es necesario emplear entre el 5 a 10% de catalizador calculado sobre la cantidad de residuos plásticos destinados al proceso de pirólisis; por tanto, los tamaños de la muestra para el presente estudio considerando las pérdidas producidas en cada fase del proceso de regeneración son de 1807 kg y 325.25 kg de catalizador agotado por día.

Tabla 2-1: Producción de residuos de plásticos en la ciudad de Riobamba

DATOS	
Producción per cápita de residuos	0.60 <i>kg/hab. d</i>
Habitantes	264000 Hab.
Cantidad total de residuos	158400 <i>kg/d</i>
10.82% residuos plásticos	17138.88 <i>kg/d</i>
18% polipropileno	3085 <i>kg/d</i>

Fuente: (Palmay et al., 2022, p. 4)

Realizado por: Vera G., 2023

2.8. Técnica de recolección de datos

2.8.1. Pérdidas en el proceso de regeneración

Tabla 2-2: Porcentaje de pérdida en cada etapa del proceso de regeneración

ETAPA	% DE PÉRDIDA
Secado	0,5079
Agitación	3,8777
Filtración y secado	0,0458
Calcinación	0,779

Fuente: (Andrade, Lisseth 2020)

Realizado por: Vera G., 2023

En la tabla 2-2 se describe el porcentaje de pérdidas derivado de cada una de las etapas del proceso; sin embargo, en el escalamiento las condiciones de trabajo se mantuvieron y únicamente varió la masa de alimentación ya que se trabajó con cantidades mayores que permitieron obtener 1713.88 kg y 308.5 kg de catalizador regenerado al día, mismos que se convirtieron en la alimentación diaria para el proceso de pirólisis catalítica de plásticos; por lo tanto, es posible emplear los mismos porcentajes de pérdida obtenidos por Andrade (2020, p.35) en su trabajo investigativo de regeneración de catalizadores agotados de la unidad de cracking catalítico fluidizado (FCC) realizado a escala de laboratorio.

Para calcular la cantidad de catalizador utilizado al inicio de cada etapa del proceso de regeneración se emplea la siguiente ecuación:

$$Cantidad_{inicial} = \frac{Cant_{final}}{1 - \frac{\% pérdida}{100}}$$

Ecuación 2-1: Cantidad inicial

2.8.2. Huella de carbono del proceso de regeneración

La huella de carbono fue determinada en base a la metodología expuesta por la norma ISO 14064-1, misma que comprende definición de los límites de la organización, definición de límites operativos, fase de cuantificación y resultados (Gobierno Vasco, 2013, p. 21):

2.8.2.1. Definición de los límites de la organización:

Esta etapa fue omitida ya que la presente investigación se fundamenta en un único proceso.

2.8.2.2. Definición de límites operativos:

Se realizó la identificación de los equipos que contribuyen a la huella de carbono a partir de un escalamiento a nivel industrial de los aparatos utilizados a nivel de laboratorio. Se tomaron en cuenta las emisiones indirectas derivadas del consumo de energía de cada aparato.

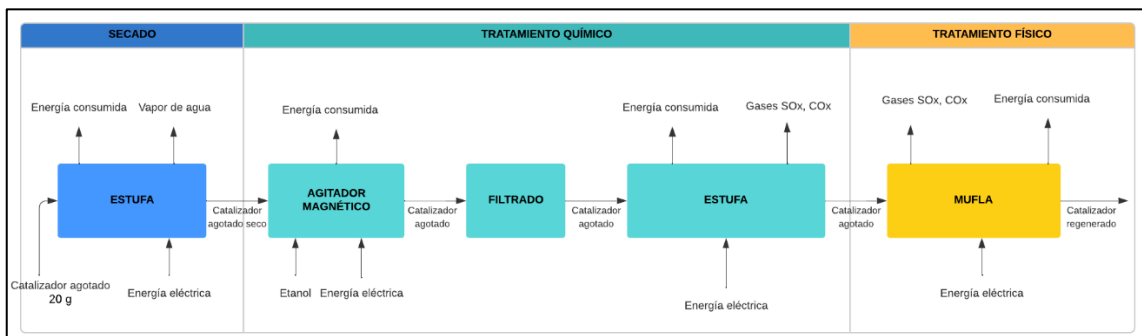


Ilustración 2-2: Proceso de regeneración a nivel de laboratorio

Realizado por: Vera G., 2023.

En la ilustración 2-2 se detalla que para una cantidad de 20 g de catalizador agotado se emplea una serie de equipos como estufa, agitador magnético y mufla; sin embargo, este procedimiento de regeneración de catalizadores se realiza a escalas industriales y por ende con cantidades mayores; por tal razón, al realizar el escalamiento es importante considerar algunos factores que inciden en la efectividad y funcionamiento óptimo de este proceso tales como el rango de temperatura de trabajo, la capacidad de alimentación, la velocidad de agitación, viscosidad de los solventes, entre otros, dichas variables son decisivas en el momento de la selección de cada instrumento (Anaya y Pedroza, 2008: p. 32) . Las condiciones de operación bajo las cuales se desarrolló un proceso de regeneración óptimo fueron tomadas del trabajo de titulación de Andrade (2020).

- Secado y calcinado

Para la selección de la estufa a escala industrial se consideró la capacidad y el rango de temperatura de trabajo, es así que dentro de la primera variable mencionada se debe seleccionar dos estufas, con un abastecimiento de 1.8 y 0.325 toneladas de catalizador agotado al día, el rango de temperatura óptimo para efectuar las funciones de secado es necesario que el horno alcance 140°C durante 2.3 h; en tanto que, para la calcinación se experimentará diferentes temperaturas,

es así que inicialmente se trabaja con 100°C; sin embargo, dicha temperatura debe ser incrementada cada hora en 50°C y posteriormente, cuando alcance los 350°C se mantiene durante 1 hora; luego se trabaja con una rampa de 25°C/h hasta llegar a 450°C, temperatura que debe conservarse por 1.5 horas y finalmente, con un incremento controlado de 50°C/h hasta obtener un valor 700°C donde se mantiene durante 2 horas, dando como resultado un total de 20.5 h para el proceso de calcinación (Andrade 2020, p. 37).

- Mezclado

La cantidad de solvente empleado en el proceso de agitación es de acuerdo a la cantidad de catalizador a regenerar, Toapanta (2018, p. 71) menciona que se utiliza un volumen de 0.2 L de solvente por cada 0.02 kg de catalizador, es decir, 0.1 kg/L, por lo que para los procesos en estudio se requiere 20 y 4 m³ de solvente.

Para el mezclado del catalizador con el solvente en un proceso que tarda 12 horas, se seleccionó un agitador horizontal considerando los criterios de viscosidad del fluido, tipo de movimiento, velocidad de agitación y capacidad; al trabajar con etanol es importante que el agitador sea funcional para viscosidades superiores a 1 cP, así también debe presentar un movimiento continuo y alcanzar una velocidad de agitación de 300 rpm. La capacidad del tanque para el proceso de 1.8 toneladas de catalizador al día fue de 20 m³ y para los 325 kg de catalizador al día el tanque alcanzó un volumen de 4m³.

- Filtrado

Barrera et al. (2015, p. 3) en su investigación Recuperación de Níquel, Vanadio y Molibdeno del catalizador agotado de la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC) menciona que el rango del tamaño de partículas del catalizador agotado es de 40 a 150 µm; además, King (2021, p. 743) manifiesta que es importante considerar el tipo de solvente con el que se va a trabajar.

En base a las especificaciones antes mencionadas, se considera un filtro rotario al vacío con tamaño de partícula de 90 µm que es el tamaño de partículas de catalizador que se presenta con mayor frecuencia, asimismo trabaja durante una hora y con etanol como solvente, por tanto, debe presentar un caudal de filtrado de 20 m³/h o mayor a este para el primer caso y de 4m³/h para el segundo caso.

- Reciclado del etanol

Con el objetivo de convertir al proceso de regeneración de catalizador agotado FCC en un procedimiento más eficiente, se planteó un sistema de recirculación de etanol a fin de que este no sea desechado en cada ciclo, mismo que consta de un tanque reservorio de etanol, columna de destilación, reboiler y blower con ciertas especificaciones basadas en bibliografía, pero no demostradas experimentalmente.

- Columna de destilación

El parámetro principal a considerar es que trabaje con un caudal de 20m³/h para tratar el caso de 1.8 toneladas de catalizador por día y 4m³/h para los 325.25 kg de catalizador por día, además se tomó en cuenta la sustancia y componentes a destilar que para el presente estudio corresponde a etanol y diminutas pérdidas de catalizador derivadas del proceso de filtrado.

- Reboiler

Al igual que la torre de destilación debe cumplir con las condiciones de caudal para un engranaje ideal de los diversos subprocesos, mismos que corresponde a 20m³/h y 4m³/h, así también, resulta importante que utilice un sistema de contacto directo con el fluido a calentar para aumentar la eficiencia del proceso. Por otro lado, se propuso un reboiler capaz de alcanzar el punto de ebullición del etanol que corresponde a 78.37°C.

- Condensado

Se seleccionó un blower adecuado para el caudal a condensar, determinando la cantidad de aire requerido a través de la siguiente ecuación:

$$Q_{abs} = Q_{ced}$$

$$(mC_p dt)_{air} = (mC_p dt)_{etanol}$$

$$m_{air} = \frac{(mC_p dt)_{etanol}}{(C_p dt)_{air}}$$

Ecuación 2-2: Flujo de aire

En la ecuación 2-2 se considera un caudal de 10 m³/h para 1.8 toneladas de catalizador por día y 4m³/h para los 325 kg de catalizador por día, la capacidad calorífica del etanol y del aire a 20°C que corresponde a 2.46 J/kg°C y 1.005 J/kg°C respectivamente, se toma en cuenta una diferencia de temperatura, siendo la máxima 78°C que respecta al punto de ebullición del etanol y una mínima de 20°C que es la temperatura ambiente en la cual este solvente se encuentra en estado líquido; en tanto que, el aire ingresa a 20°C y sale a 40°C existiendo un diferencial de 20°C, situación que coincide con lo expresado por Towler y Sinnott (2019, p. 814) quienes indican que los sistemas de refrigeración para una condensación ideal deberán tener un diferencial mínimo de temperatura del aire de 20°C.

2.8.2.3. Fase de cuantificación:

Se efectuaron los cálculos respectivos que consisten en la multiplicación de los datos de la actividad de GEI por los factores de emisión, para el presente estudio corresponde al producto del consumo energético de los equipos por el factor de emisión de electricidad.

- Consumo energético de los equipos

Para determinar la huella de carbono del proceso es necesario calcular el consumo energético de cada uno de los equipos, que, de acuerdo a la fórmula de consumo se debe conocer la potencia y las horas de trabajo de los mismos. Los valores de potencia fueron obtenidos de fuentes bibliográficas de acuerdo a la capacidad requerida en la investigación y el tiempo de trabajo se extrajo de una investigación de regeneración de catalizadores agotados a nivel de laboratorio y se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla 2-3: Tiempo de operación por equipo

TRATAMIENTO	EQUIPO	TIEMPO DE OPERACIÓN
Pretratamiento	Horno	2.3 horas
Tratamiento químico	Agitador	12 horas
	Filtro	1 horas
	Horno	2.6 horas
Tratamiento térmico	Horno	20.5 horas

Fuente: (Andrade, Lisseth 2020)

Realizado por: Vera G., 2023

La ecuación de cálculo de consumo energético es:

$$Consumo = P * t$$

Ecuación 2-3: Consumo energético

Donde:

P = Potencia

t = tiempo

Para la determinación del consumo energético global se realiza una sumatoria de los consumos de energía individuales.

Consumo energético total sin reciclado de etanol

$$CT = Consumo (secado + mezclado + filtrado + secado + calcinado)$$

Ecuación 2-4: Consumo sin reciclado de etanol

Consumo energético total con reciclado de etanol

$$CT = Consumo (secado + mezclado + filtrado + secado + calcinado + columna + reboiler + blower)$$

Ecuación 2-5: Consumo con reciclado de etanol

- Factor de emisión

(Comisión Técnica de determinación de Factores de Emisión de gases efecto invernadero 2021, p. 14) Para determinar la huella de carbono derivada de la regeneración de catalizadores agotados es importante considerar el consumo de energía eléctrica de los equipos involucrados en el proceso, resultando necesario el cálculo del factor de emisión para el consumo de energía eléctrica a partir de la siguiente ecuación:

$$Factor\ de\ emisión = \frac{Emisiones\ totales\ de\ CO_2\ de\ la\ generación\ (kg\ CO_2)}{Electricidad\ generada\ (kWh)}$$

Ecuación 2-6: Factor de emisión

Cabe mencionar que en la aplicación del factor de emisión dentro del cálculo de la huella de carbono, las unidades deberán ser acordes a la actividad desarrollada, es así que los factores de emisión dependen de la entidad encargada de su cuantificación; por tanto, el factor de emisión empleado en la presente investigación corresponde al de la energía eléctrica (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico 2022, p. 6).

Una vez determinado el consumo energético y el factor de emisión de electricidad se procedió a calcular la huella de carbono a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

Ecuación 2-7: Huella de carbono

Donde:

DA = dato de actividad

FE = factor de emisión

Huella de carbono total sin reciclado de etanol

$$\text{Huella de carbono total} = HdC (\text{pretrat.} + \text{trat. químico} + \text{trat. térmico})$$

Ecuación 2-8: Huella de carbono sin reciclado

Huella de carbono con reciclado de etanol

$$\text{Huella de carbono total} = HdC (\text{pretrat.} + \text{trat. químico} + \text{trat. térmico} + \text{reciclado})$$

Ecuación 2-9: Huella de carbono con reciclado

2.8.2.4. *Realización del informe de los resultados obtenidos:*

Los resultados se expresan en kilogramos de CO₂eq y servirán como punto de referencia y comparación con otros inventarios de emisiones de GEI.

CAPITULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Tamaños de muestras

Tabla 3-1: Cantidad de catalizador regenerado a emplear de acuerdo a la cantidad de residuos plásticos

Cantidad de residuos plásticos	Cantidad de catalizador regenerado (10%)
17138.88 kg/d	1713.88 kg/d
3085 kg/d	308.5 kg/d

Realizado por: Vera G., 2023

La cantidad de residuos plásticos generados en la ciudad de Riobamba diariamente es de 17138.88 kg/d, de los cuales 3085 kg/d corresponden a polipropileno; por lo tanto, en base a dichas cantidades se determinó que para el proceso de pirólisis de residuos plásticos en general se debe utilizar 1713.88 kg/d de catalizador regenerado, en tanto que para una pirólisis de plásticos de polipropileno se empleará 308 kg/d de catalizador regenerado. Por lo que para conocer la cantidad de catalizador agotado que entra al proceso de regeneración se considera las pérdidas en cada fase.

3.1.1. Cantidad de catalizador agotado para cantidad de residuos plásticos diarios

Tabla 3-2: Cantidad de catalizador agotado que ingresa a cada equipo para 1713.88kg/d de catalizador regenerado

Proceso	Porcentaje de pérdida	Flujo de alimentación
Calcinación	0.779%	1727.33 kg/d
Filtrado	0.0458%	1728.12 kg/d
Agitado	3.877%	1797.82 kg/d
Secado	0.5079%	1807 kg/d

Realizado por: Vera G., 2023

En la tabla 3-2 se detalla la cantidad de catalizador agotado que ingresa en cada equipo, mismo que se estimó a través de un cálculo retrospectivo, partiendo del valor deseado de catalizador regenerado que corresponde a 1713.88 kg/d y considerando los porcentajes de pérdida derivados de cada proceso que fueron detallados en la tabla 2-2, es así que para este caso se estimó una

fuente de alimentación inicial de 1.8 toneladas al día de catalizador agotado determinadas a partir de la Ecuación 2-1.

Los cálculos se detallan en el Anexo A

3.1.2. Cantidad de catalizador agotado para residuos de polipropileno diarios

Tabla 3-3: Cantidad de catalizador agotado que ingresa a cada equipo para 308.5 kg/d de catalizador regenerado

Proceso	Porcentaje de pérdida	Flujo de alimentación
Calcinación	0.779%	310.92 kg/d
Filtrado	0.0458%	311.06 kg/d
Agitado	3.877%	323.60 kg/d
Secado	0.5079%	325.25 kg/d

Realizado por: Vera G., 2023

De acuerdo al proceso descrito en el apartado 3.1.1 y considerando los mismos porcentajes de pérdida se determinó para este caso una fuente de alimentación de 325.25 kg/d de catalizador de agotado, a fin de obtener al finalizar el proceso 308.5 kg/d de catalizador regenerado, cantidad indispensable para la pirólisis de polipropileno.

Los cálculos se desglosan en el Anexo B.

3.2. Huella de Carbono del proceso de regeneración

3.2.1. Definición de los límites operativos

3.2.1.1. Equipos seleccionados para regenerar 1.8 toneladas de catalizador agotado al día

- Equipos del pretratamiento

Secado

Se seleccionó un horno de cámara con circulación de aire KTR 21300, mismo que alcanza temperaturas desde 100 hasta 300 °C y una capacidad de 2000 kg, además se considera un equipo adecuado para procesos de secado ya que presenta buena homogeneidad de temperatura (Nabertherm, 2021, p. 11).

Tabla 3-4: Características del horno para el secado de 1.8 toneladas de catalizador

Condiciones de escalamiento	Horno de cámara con circulación de aire KTR 21300
<ul style="list-style-type: none">• Capacidad de 1.8 ton• Temperatura superior a 100 °C	<ul style="list-style-type: none">• T max: 300°C• Dimensiones internas: Ancho 2000, profundidad 4000 y alto 2000 mm• Dimensiones externas en mm: Ancho 2870, profundidad 4850 y alto 2960• Potencia: 45 Kw• Capacidad: 2000 kg

Fuente: (Nabertherm, 2021, p. 9)

Realizado por: Vera G., 2023

- Equipos del tratamiento químico

Mezclado

En base a los resultados bibliográficos se determina que la opción ideal para el proceso de agitación es un agitador horizontal de serie HPS, el cual ofrece un mezclado continuo para grandes volúmenes brindando la función de suspender los sólidos, características adecuadas para escala industrial, puesto que en la presente investigación se trabaja con un volumen de 20m³ es necesario mantener en movimiento continuo al catalizador para que los sólidos no sedimenten; el agitador seleccionado alcanza las velocidades y volumen requeridos además de que los costes operativos son bajos (CFG, 2020, p. 11).

Tabla 3-5: Características del agitador para 20 m³ de etanol

Condiciones de escalamiento	Agitador horizontal serie HPS
<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidad: Superior a 1cP • Movimiento continuo • 300 rpm • Volumen: 20000 L (20m³) 	<ul style="list-style-type: none"> • Depósitos: de 10 a 500 m³. • Para productos de viscosidad moderada. • Velocidad: de 100 a 300 rpm. • Motor: 40 kW. • Hélice: de perfil axial tripala tipo “S”. • Diámetro de hélice: de 200 a 1200 mm. • Longitud máxima de eje: 1800 mm. • Reductor de ejes paralelos, engranaje cónico.

Fuente: (CFG, 2020, p. 11)

Realizado por: Vera G., 2023

Filtrado

Una vez evaluadas diferentes opciones de filtros se establece que para el proceso de regeneración de catalizador resulta conveniente la implementación de un filtro rotatorio al vacío que a su vez se encarga de la separación del catalizador con el solvente. Cabe argumentar que los filtros rotatorios al vacío son ideales para este proceso porque poseen una alta eficiencia para la separación continua de sólidos, trabajan con tamaños de partícula de 5-100 µm, además en la industria química son ampliamente utilizados para silicatos, zeolitas, fertilizantes, catalizadores, carbón activo, entre otros (TEFSA, 2021, p. 8).

Tabla 3-6: Características del filtro rotatorio al vacío para 20 m³/h

Condiciones de escalamiento	Filtro rotatorio al vacío
<ul style="list-style-type: none"> • Caudal 20m³/h • Tipo de solvente (Etanol) • Tamaño de partículas de catalizador 40-150 µm • Cantidad de partícula a filtrar: 1.8 toneladas 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso en servicio: 4.5 Ton • Área filtrante: 6 m² • Presión máx. de descarga: 8.6 bar • Tamaño de partícula: 5-80 µm • Potencia: 5.59 kW • Dimensiones del tambor en mm: diámetro 1310 ancho 1500 • Dimensiones del filtro en mm: ancho 2300 alto 2000

Fuente: (TEFSA, 2021, p. 8)

Realizado por: Vera G., 2023

- Equipos del tratamiento térmico

Calcinado

Para efectuar la calcinación del catalizador es óptimo el uso de un horno con cámara de circulación de aire KTR 22500, mismo que alcanza una temperatura de 850 °C por lo que es capaz de realizar este procedimiento sin inconveniente que únicamente requiere como temperatura máxima 700°C; además cumple los estándares de capacidad deseados ya que abastece hasta 2000 kg (Nabertherm, 2021, p. 9).

Tabla 3-7: Características del horno para el calcinado de 1.8 toneladas de catalizador

Condiciones de escalamiento	Horno de cámara con circulación de aire KTR 22500
<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de 1.8 ton • Temperatura 100 - 700 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • T max: 850°C • Dimensiones internas: Ancho 2650, profundidad 3550 y alto 2300 mm • Dimensiones externas en mm: Ancho 3600, profundidad 4195 y alto 3380 • Potencia: 90 Kw

Fuente: (Nabertherm, 2021, p. 9)

Realizado por: Vera G., 2023

- Equipos del reciclado de etanol

Columna de destilación

La determinación del caudal resulta imprescindible para el cálculo de la potencia consumida en base al factor expresado por Marriaga (2009, p. 82) en su trabajo titulado Indicadores de desempeño de la destilación de bioetanol, en el que manifiesta un consumo de 0.97 kW por kL/d; este factor se pudo utilizar ya que el etanol y bioetanol presentan puntos de ebullición equivalentes, mismos que representan el principio de funcionamiento en un proceso de destilación, por tanto se consideró el mismo valor del factor para la presente investigación.

Tabla 3-8: Características de la columna de destilación para 20m³

Condiciones de escalamiento	Columna de destilación
<ul style="list-style-type: none">• Capacidad 20 m³	<ul style="list-style-type: none">• Potencia: 465.6 kW

Fuente: (Marriaga ,2009, p. 82)

Realizado por: Vera G., 2023

Reboiler

Benabithe et al. (2020, p. 5) en su investigación denominada Caso de estudio de la destilación etanol-agua en operación continua y discontinua y su simulación en ecuaciones cúbicas de estado y modelos de actividad expresa una potencia para el reboiler de 1kW para una capacidad de 15 L, relación que permitió calcular la potencia con un volumen de 20 m³.

Tabla 3-9: Características del reboiler para 20m³

Condiciones de escalamiento	Columna de destilación
<ul style="list-style-type: none">• Capacidad 20 m³	<ul style="list-style-type: none">• Potencia: 1333.33 kW

Fuente: (Benabithe et al.,2020, p. 5)

Realizado por: Vera G., 2023

Blower

Tabla 3-10: Cantidad de aire requerido para la selección del blower de 1.8 tonelada de catalizador al día

Flujo de etanol	Caudal de aire
10 m ³ /h	71 m ³ /h

Realizado por: Vera G., 2023

En la tabla 3-10 se expresa el resultado en base a la ecuación 2-2, mismo que reportó que para el sistema de reciclaje de etanol con un flujo de 10 m³/h, es necesario un blower con un caudal de aire de 71 m³/h; los cálculos se desglosan en el Anexo C.

Tabla 3-11: Características del blower para 10 m³/h de flujo de etanol

Condiciones de escalamiento	Blower industrial línea 2RB 210 7AV15 – B003
<ul style="list-style-type: none">• Caudal aire 71 m³/h	<ul style="list-style-type: none">• Caudal máximo: 96 m³/h• Voltaje: 110 V• Potencia: 0.450 kW• Presión: 14 kPa• Salida y entrada: 1 ¼’’• Dimensiones cm: alto 36, largo 36, ancho 36• Peso: 13 kg

Fuente: (Deakro 2022, p. 2)

Realizado por: Vera G., 2023

Una vez realizado un análisis bibliográfico se determinó que para las funciones de condensación es útil un blower industrial línea 2RB 210 7AV15- B003, este fue seleccionado en base al criterio de caudal de aire necesario que para el efecto corresponde a 71 m³/h; no obstante, este caudal fue calculado en base a la ecuación 2-2 que considera los diferenciales de temperatura tanto del etanol como del aire, la capacidad calorífica y el flujo volumétrico del etanol (Deakro 2022, p. 2).

3.2.1.2. Equipos seleccionados para regenerar 325.25 kg de catalizador agotado al día

- Equipos del pretratamiento

Secado

Para las funciones de secado en el escalamiento de 325.25 kg se ha seleccionado un horno con cámara de circulación de aire TR 450 LS que presenta características térmicas similares al utilizado en el proceso de 1.8 toneladas; sin embargo, la capacidad corresponde únicamente a 400 kg; de acuerdo a Saavedra (2020, p. 126) no es recomendable utilizar un equipo con características que excedan mucho a los requerimientos ya que la potencia consumida incrementaría de forma innecesaria; por tanto, en el presente proyecto se ha optado por un equipo de menor capacidad a pesar de que el descrito en el pretratamiento del apartado 3.2.1.1 podría ejercer esta función en este proceso.

Tabla 3-12: Características del horno para el secado de 325.25 kg de catalizador agotado al día

Condiciones de escalamiento	Horno de cámara con circulación de aire TR 450 LS
<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de 325.25 kg • Temperatura 100°C – 300 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad: 400 kg • T max: 300°C • Dimensiones internas: Ancho 1200, profundidad 670 y alto 1000 mm • Dimensiones externas en mm: Ancho 1470, profundidad 970 y alto 1520 • Potencia: 6.3 Kw

Fuente: (Nabertherm, 2021, p. 11)

Realizado por: Vera G., 2023

- Equipos del tratamiento químico

Mezclado

La agitación de 4 m³ de etanol con catalizador se llevó a cabo mediante un agitador horizontal serie VPP que comparte las mismas características de viscosidad, tipo de movimiento y velocidad con el agitador HPS empleado para 20 m³, pero difiere en la capacidad del tanque y por ende el volumen de agitación, el cual requiere una potencia menor como se mencionó en la descripción del horno para este mismo proceso (CFG, 2020, p. 8).

Tabla 3-13: Características del agitador para 4m³

Condiciones de escalamiento	Agitador horizontal serie VPP
<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidad: Superior a 1cP • Movimiento continuo • 300 rpm • Volumen: 3.252 m³ 	<ul style="list-style-type: none"> • Depósitos: de 0.5 a 5 m³. • Para productos de viscosidad moderada. • Velocidad: de 150 a 300 rpm. • Motor: 3 kW. • Hélice: de perfil axial tipo “S”. • Diámetro de hélice: de 150 a 400 mm. • Longitud máxima de eje: 1500 mm. • Reductor coaxial, engranaje cónico.

Fuente: (CFG, 2020, p. 8)

Realizado por: Vera G., 2023

Filtrado

Las diferencias con el filtro rotatorio al vacío del proceso de 20 m³ radica en el caudal que para este caso corresponde a 3.2 m³/h, el peso en servicio de 2 toneladas y el área filtrante que tiene una extensión menor siendo de 0.72 m². Se mantienen constantes las características del solvente con el que se trabaja y el tamaño de partículas del catalizador (TEFSA, 2021, p. 8).

Tabla 3-14: Características del filtro rotatorio al vacío para 4m³/h

Condiciones de escalamiento	Filtro rotatorio al vacío
<ul style="list-style-type: none">• Caudal 3.2 m³/h• Tipo de solvente (Etanol)• Tamaño de partículas de catalizador 40-150 μm• Cantidad de partícula a filtrar: 325.25 kg	<ul style="list-style-type: none">• Peso en servicio: 2 Ton• Área filtrante: 0.72 m²• Presión máx. de descarga: 3 bar• Tamaño de partícula: 5-80 μm• Potencia: 1.5 kW• Dimensiones del tambor en mm: diámetro 920, ancho 250• Dimensiones del filtro en mm: ancho 2050, alto 1700

Fuente: (TEFSA, 2021, p. 8)

Realizado por: Vera G., 2023

- Equipos del tratamiento térmico

Calcinado

Se ha elegido un horno de cámara con circulación de aire TR 800 ya que puede alcanzar temperaturas de 850° C siendo ideal para la calcinación de una cantidad de 325.25 kg de catalizador al día (Nabertherm, 2021, p. 11).

Tabla 3-15: Características del horno para calcinado de 325.25 kg de catalizador al día

Condiciones de escalamiento	Horno de cámara con circulación de aire TR 800
<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de 325.25 kg • Temperatura hasta 700 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad: 400 kg • T max: 850°C • Dimensiones internas: Ancho 1200, profundidad 670 y alto 1400 mm • Dimensiones externas en mm: Ancho 1470, profundidad 970 y alto 1920 • Potencia: 12.6 kW

Fuente: (Nabertherm, 2021, p. 11)

Realizado por: Vera G., 2023

- Equipos del reciclado de etanol

Columna de destilación

Se procedió al cálculo utilizando el mismo factor empleado para determinar la potencia de la columna de destilación del proceso de 20 m³, variando únicamente el valor del volumen.

Tabla 3-16: Característica de la columna de destilación para 4m³

Condiciones de escalamiento	Columna de destilación
<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad 4 m³ 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia: 93.12 kW

Fuente: (Marriaga ,2009, p. 82)

Realizado por: Vera G., 2023

Reboiler

La potencia del reboiler se establece en base a la misma relación expresada por Benabithe et al. (2020, p. 5).

Tabla 3-17: Característica del reboiler para 4m³

Condiciones de escalamiento	Reboiler
<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad: 4 m³ 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia: 266.66 kW

Fuente: (Benabithe et al.,2020, p. 5)

Realizado por: Vera G., 2023

Blower

Tabla 3-18: Cantidad de aire requerido para la selección del blower de 325.25 kg de catalizador al día

Flujo de etanol	Caudal de aire
4 m ³ /h	28.39 m ³ /h

Realizado por: Vera G., 2023

En la tabla 3-18 se expresa el resultado en base a la ecuación 2-2, para un sistema de reciclado de etanol con un flujo de 4 m³/h, el caudal de aire deber ser de 28.39 m³/h; los cálculos se desglosan en el anexo C.

Tabla 3-19: Características del blower para 4m³/h

Condiciones de escalamiento	Blower industrial línea HG-250C-B027
<ul style="list-style-type: none">• Caudal aire 28.39 m³/h	<ul style="list-style-type: none">• Caudal máximo: 35 m³/h• Voltaje: 110 V• Potencia: 0.250 kW• Presión: 12 kPa• Salida y entrada: 1''• Dimensiones cm: alto 29, largo 29, ancho 29• Peso: 9 kg

Fuente: (Deakro 2022, p. 5)

Realizado por: Vera G., 2023

La condensación de 4m³/h de etanol se efectuó a través de un blower industrial línea HG-250C-B027 porque presenta un caudal máximo de aire de 35m³/h y en cálculos se determinó que requiere un caudal de aire de 28.39 m³/h (Deakro 2022, p. 5).

3.2.2. Fase de cuantificación

3.2.2.1. Consumo energético de los equipos

- Consumo energético de los equipos para 1.8 toneladas de catalizador al día

Tabla 3-20: Consumo energético total con reciclado de etanol para 1.8 toneladas al día

Consumo Total		
TRATAMIENTO	TIEMPO	CONSUMO ENERGÉTICO
Pretratamiento	2.3 h	103.5 kWh
Tratamiento químico	15.6 h	602.59 kWh
Tratamiento térmico	20.5 h	1845 kWh
Reciclado de etanol	4 h	1799.83 kWh
Total	42.4 h	4350.9 kWh

Realizador por: Vera G., 2023

En la tabla 3-20 se reporta un consumo energético total de 4350.9 kWh para el proceso de regeneración de 1.8 toneladas de catalizador invirtiendo un tiempo de 42.4 h en total, de los cuales 103.5 kWh se consumen durante el pretratamiento específicamente en el proceso de secado que se lleva a cabo en 2.3 h, así también, 602.59 kWh corresponden al tratamiento químico en el cual se ejecutan funciones de agitación, filtrado y secado que conllevan 15.6 horas, además el tratamiento térmico alcanza un consumo de energía de 1845 kWh en un tiempo de 20.5 horas que corresponden al proceso de calcinación y finalmente, el sistema de reciclado de etanol representa un consumo de 1799.83 kWh en un tiempo estimado de 4 horas. Los cálculos en los que se especifica los consumos energéticos de cada equipo se realizaron mediante la ecuación 2-3 y se encuentran en el Anexo D.

- Consumo energético de los equipos para 325.25 de catalizador al día

Tabla 3-21: Consumo energético total con reciclado de etanol para 325.25 kg de catalizador al día

Consumo Total		
TRATAMIENTO	TIEMPO	CONSUMO DE ENERGÍA
Pretratamiento	2.3 h	14.49 kWh
Tratamiento químico	15.6 h	53.88 kWh
Tratamiento térmico	20.5 h	258.3 kWh
Reciclado de etanol	4 h	360 kWh
Total	42.4 h	686.67 kWh

Realizador por: Vera G., 2023

En la tabla 3-21 se refleja un consumo de energía de 14.49 kWh en las operaciones de secado que corresponden al pretratamiento, durante el tratamiento químico que engloba la agitación, filtrado y secado se consumió 53.88 kWh, en la calcinación que involucra el tratamiento térmico se reportó un consumo de energía de 258.3 kWh y por último, en el reciclado de etanol se obtuvo un consumo de energía de 360 kWh; cabe mencionar que las diferencias de consumo energético con el proceso de regeneración de 1.8 toneladas de catalizador al día radican fundamentalmente en la potencia de los equipos que para este caso son menores porque se trabaja con un volumen menor; en tanto que, los tiempos de operación permanecen constantes. Se utilizó la ecuación 2-3 para efectuar los cálculos correspondientes que se detallan en el Anexo E.

- Consumo energético de los dos casos con reciclado de etanol

Tabla 3-22: Consumo energético total de los dos casos con reciclado de etanol

Consumo Total para 1.8 tonelada de catalizador al día	
Pretratamiento	103.5 kWh
Tratamiento químico	602.59 kWh
Tratamiento térmico	1845 kWh
Reciclado de etanol	1799.83
Consumo Total para 325.25 kg de catalizador al día	
Pretratamiento	14.49 kWh
Tratamiento químico	53.88 kWh
Tratamiento térmico	258.3 kWh
Reciclado de etanol	360 kWh

Realizador por: Vera G., 2023

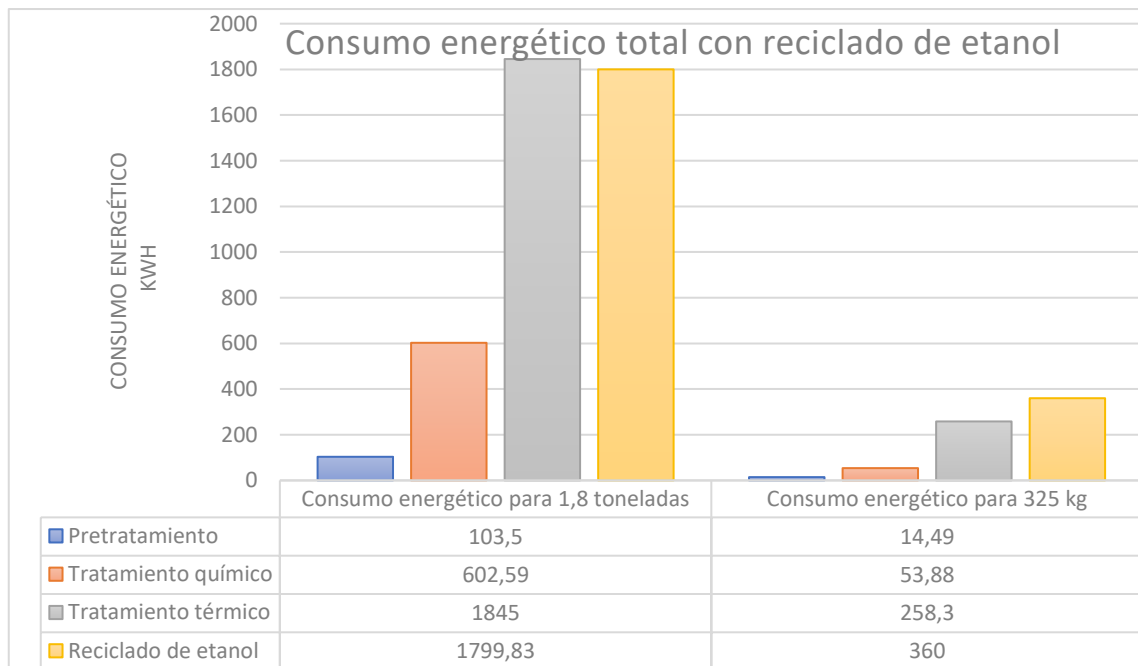


Ilustración 3-1: Diagrama comparativo del consumo energético total con reciclado de etanol

Realizador por: Vera G., 2023

Al analizar la ilustración 3-1 se puede evidenciar un mismo patrón de comportamiento ya que en los dos casos (1.8 ton y 325 kg) se observa un consumo energético menor en el pretratamiento, aumenta en el tratamiento químico y presenta los valores más elevados para el tratamiento térmico; estos resultados se justifican con el tiempo que tarda cada una de las fases ya que en el pretratamiento se emplean 2.3 horas, en la etapa química se demora 15.6 horas y finalmente, en

la fase térmica el tiempo asciende a 20.5 horas; esto se corrobora con lo manifestado por Portillo et al. (2020, p. 9) quien expresa una relación directamente proporcional entre el consumo energético y el tiempo de trabajo.

En referencia al pretratamiento, una vez realizados los cálculos respectivos se determinó que, en el secado el consumo energético del horno con cámara de circulación de aire KTR 21300 empleado para 1.8 toneladas de catalizador corresponde a 103.5 kWh y el horno de serie TR450LS utilizado para secar 325.25 kg de catalizador alcanza un consumo de 14.49 kWh; esta diferencia radica en la capacidad que cada uno de los equipos posee, las variables tiempo y temperatura se mantienen constantes en los dos casos ya que Rojas (2016, p. 17) afirma que si estas condiciones son alteradas se producen variaciones significativas en las características del catalizador y por ende en los resultados de regeneración.

En el tratamiento químico se encuentran involucrados equipos de agitación, filtrado y secado en cada uno de los procesos con las capacidades respectivas; sin embargo, la variación mayor de esta fase está representada por el agitador existiendo un diferencial de consumo energético de 444 kWh a favor del agitador horizontal serie HPS empleado para 1.8 toneladas de catalizador; en tanto que, la filtración no representa una variación tan significativa a la diferencia observada en el consumo energético total ya que esta solamente corresponde a 4.09 kWh. Finalmente, el tratamiento térmico es la fase que presenta mayor consumo energético en los dos casos de estudio puesto que corresponde a 1845 kWh y 258.3 kWh para 1.8 toneladas de catalizador y 325.25 kg de catalizador respectivamente, los valores elevados se deben a la temperatura empleada en esta etapa que cubre un rango de 100 a 700°C; cabe mencionar que la temperatura también es una magnitud proporcional al consumo energético.

La ilustración 3-1 muestra también el consumo energético de un sistema de reciclado de etanol que involucra una columna de destilación, un reboiler y un blower, mismos que en conjunto reportan un consumo energético de 1799.83 kWh y 360 kWh para 1.8 toneladas de catalizador y 325 kg de catalizador respectivamente, que a su vez representa el diferencial de potencial al comparar con el proceso sin este reciclaje. Es importante destacar que la columna de destilación y el reboiler son equipos diseñados, por tanto, su potencia no es un valor preestablecido, por el contrario, fue determinada en base al factor encontrado en bibliografía, mientras que el blower si es un equipo con una potencia fija tomado de un modelo preexistente que se ajustaba a los requerimientos del proceso específicamente en base al caudal de aire.

3.2.2.2. Factor de emisión

Las emisiones totales de CO₂ registradas durante la generación de energía eléctrica en el Ecuador es de 1547194.18 kg CO₂. Para el cálculo se toma en cuenta la energía eléctrica generada durante el año 2022-2023, el cual fue de 3967164.564 Kwh.

$$\text{Factor emisión} = \frac{1547194.18 \text{ kg CO}_2}{3967164.564 \text{ Kwh}}$$

$$\text{Factor emisión} = 0.39 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{Kwh}}$$

3.2.2.3. Huella de carbono

- Huella de carbono en la regeneración de 1.8 toneladas de catalizador al día

Tabla 3-23: Huella de carbono total con reciclado de etanol para 1.8 toneladas de catalizador al día

Huella de carbono Total	
Pretratamiento	40.36 kg CO ₂ eq
Tratamiento químico	235 kg CO ₂ eq
Tratamiento térmico	719.5 kg CO ₂ eq
Reciclado de etanol	701.93 kg CO ₂ eq
Total	1696.8 kg CO ₂ eq

Realizador por: Vera G., 2023

En la tabla 3-23 se expone una huella de carbono total de 1696.8 kg CO₂eq derivada de los distintos tratamientos que conlleva la regeneración de 1.8 toneladas de catalizador al día, dentro de la cual se obtiene un aporte de 40.36 kg CO₂eq en el pretratamiento, 235 kg CO₂eq se derivan del tratamiento químico, en el térmico se producen 719.5 kg CO₂eq y finalmente, el reciclado de etanol contribuye con 701.93 kg CO₂eq a la huella de carbono total. Los cálculos se detallan en el Anexo F, y fueron obtenidos por la ecuación 2-7.

- Huella de carbono en la regeneración de 325.25 kg de catalizador al día

Tabla 3-24: Huella de carbono total con reciclado de etanol para 325.25 kg de catalizador al día

Huella de carbono Total	
Pretratamiento	5.65 kg CO ₂ eq
Tratamiento químico	21.01 kg CO ₂ eq
Tratamiento térmico	101 kg CO ₂ eq
Reciclado de etanol	140.4 kg CO ₂ eq
Total	268.06 kg CO ₂ eq

Realizador por: Vera G., 2023

En la tabla 3-24 se observa una huella de carbono total de 268.06 kg CO₂eq derivada de la regeneración de 325.25 kg de catalizador, en el pretratamiento se hace un aporte de 5.65 kg CO₂eq, el tratamiento químico contribuye con 21.01 kg CO₂eq; en tanto que, el tratamiento térmico hace una contribución de 101 kg CO₂eq y, por último, la aportación del reciclado de etanol corresponde a 140.4 kg CO₂eq. Estos valores fueron obtenidos mediante la ecuación 2-7 y los cálculos se detallan en el Anexo G.

- Comparación de la huella de carbono de los dos casos con reciclado de etanol

Tabla 3-25: Huella de carbono total de los dos casos con reciclado de etanol

Huella de carbono para 1.8 toneladas de catalizador	
Pretratamiento	40.36 kg CO ₂ eq
Tratamiento químico	235 kg CO ₂ eq
Tratamiento térmico	719.5 kg CO ₂ eq
Reciclado etanol	701.93 kg CO ₂ eq
Total	1696.79 kg CO ₂ eq
Huella de carbono para 325.25 kg de catalizador	
Pretratamiento	5.65 kg CO ₂ eq
Tratamiento químico	21.01 kg CO ₂ eq
Tratamiento térmico	101 kg CO ₂ eq
Reciclado de etanol	140.4 kg CO ₂ eq
Total	268.06 kg CO ₂ eq

Realizador por: Vera G., 2023

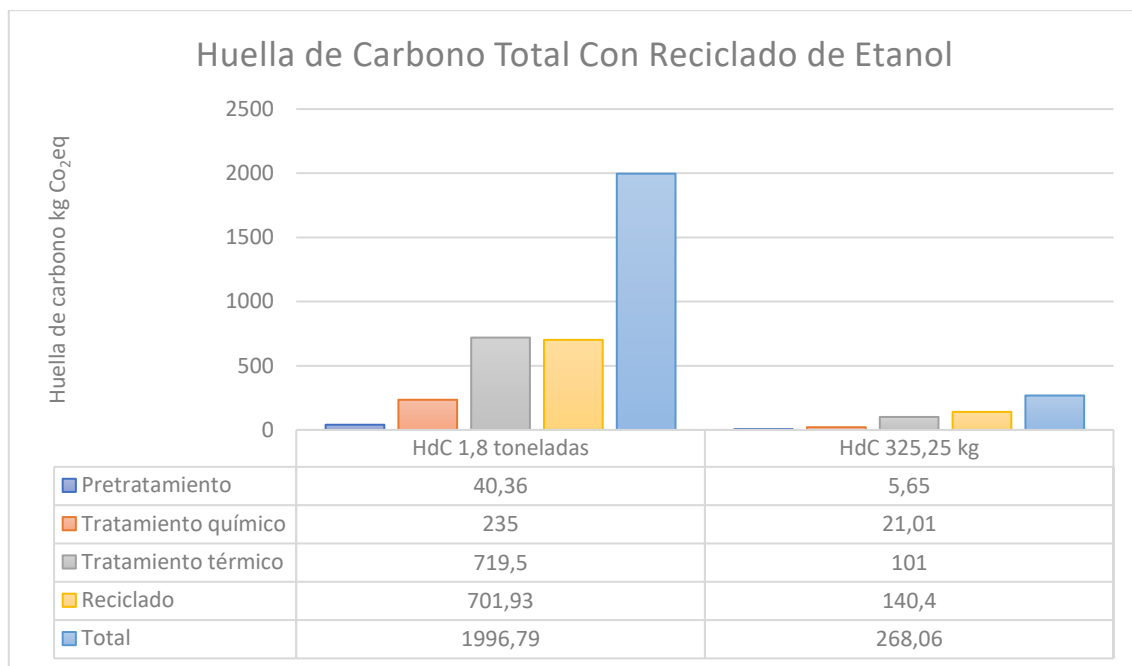


Ilustración 3-2: Diagrama comparativo de la huella de carbono total con reciclado de etanol

Realizador por: Vera G., 2023

En la ilustración 3-2 se determinó una huella de carbono superior en el proceso de mayor cantidad de catalizador agotado destacando que en cada una de las fases se observa esta diferencia con el mismo patrón de comportamiento reportado en el diagrama de consumo energético ya que las variables consumo de energía y huella de carbono se relacionan de forma directa. Durante el pretratamiento se establece 40.36 kg CO₂eq de huella de carbono para el proceso de 1.8 toneladas; mientras que, para el de 325.25kg corresponde únicamente a 5.65 kg CO₂eq; así también, en la fase de tratamiento químico se evidencia que este indicador ambiental alcanza 235 kg CO₂eq para el caso de mayor cantidad y solamente 21.01 kg CO₂eq para el otro y finalmente, para el tratamiento térmico los valores de huella de carbono corresponden a 716.5 y 101 kg CO₂eq para 1.8 ton y 325 kg de catalizador respectivamente; es importante mencionar que a pesar del conjunto de equipos que involucra el tratamiento químico presenta una HdC menor que el tratamiento térmico ya que esta fase es la que alcanza la mayor temperatura y presenta mayor tiempo de operación correspondiendo a 20.5 horas.

El proceso de reciclaje de etanol en el sistema de 1.8 toneladas de catalizador aporta 701.93 kg CO₂eq, en tanto que en el sistema de 325.25 kg de catalizador este procedimiento de reciclaje contribuye con 140.4 kg CO₂eq, lo que significa un incremento en la huella de carbono global dando como resultado 1996.79 kg CO₂eq para el caso con mayor cantidad de catalizador y 268.06 kg CO₂eq para el segundo caso; por tanto, la adhesión de un sistema de reciclaje del solvente no resulta óptimo debido al elevado consumo energético que suponen los equipos involucrados en

esta fase extra que a su vez se traduce en una contribución notable al índice HdC y a la problemática de contaminación de aire atribuida a los GEI emanados.

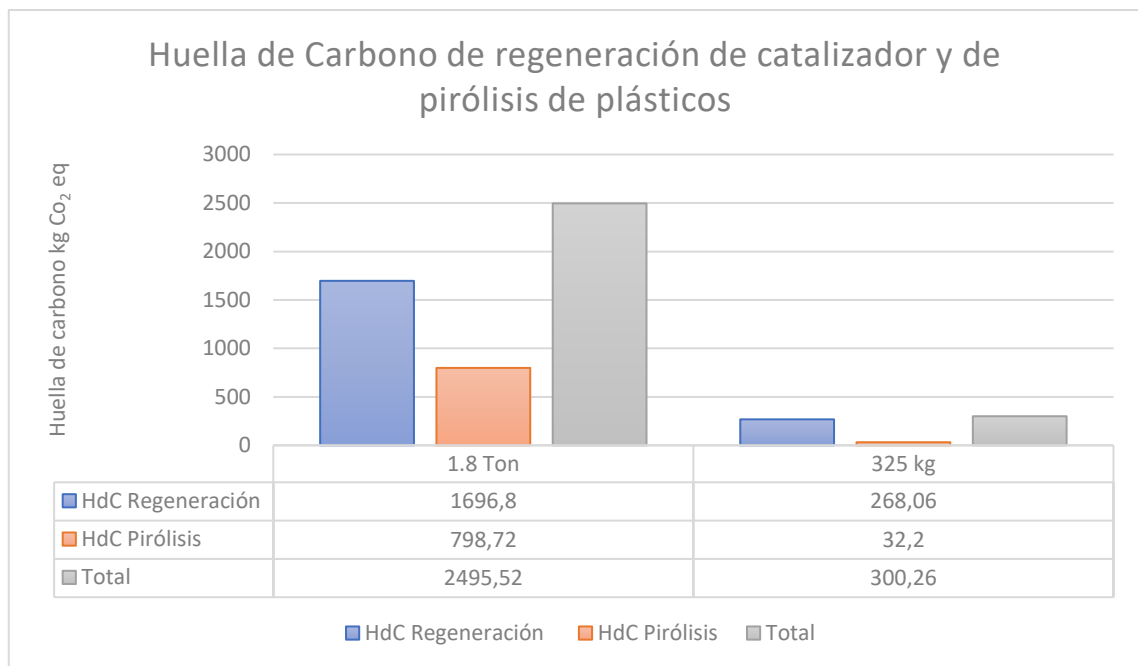


Ilustración 3-3: Huella de carbono de regeneración de catalizador y de pirólisis de plásticos

Realizador por: Vera G., 2023

En la ilustración 3-3 se muestra una sumatoria de la huella de carbono consecuencia del proceso de regeneración de catalizador más la huella de carbono derivada del proceso de pirólisis como tal, obteniendo los valores del trabajo de titulación de Barzola (2023, p. 64), mismo que antecede al presente estudio; es así que para el tratamiento de la cantidad de plásticos en general producidos en la ciudad de Riobamba diariamente (17138.88 kg/d) mediante pirólisis se determina una huella de carbono de 2495.52 kg CO₂eq; mientras que, en la pirólisis de 3085 kg de polipropileno producidos diariamente en esta ciudad se calculó una huella de Carbono de 300.26 kg CO₂eq. Estos datos permiten establecer que por cada kg de plástico tratado mediante pirólisis con catalizador agotado FCC se produce una HdC de 0.12 kg CO₂eq y por cada kg de polipropileno sometido al mismo procedimiento se genera 0.15 kg CO₂eq.

Al establecer una comparación de los datos obtenidos por kg de polipropileno con la investigación de Aristizábal et al. (2020, p. 15) es posible inferir que el proceso químico desarrollado en este trabajo refleja una huella de carbono mayor pues, Aristizábal et al. en su investigación menciona el caso de una recicladora de PP que trabaja con un cubo prensado de volumen final de 400 kg y reporta una huella de carbono de 1.40 kg CO₂eq, lo que significa que por cada kg de PP tratado mediante reciclaje mecánico se deriva una HdC de 0.0035 kg CO₂eq siendo mucho menor a la

emitida en el proceso de pirólisis mediada por catalizador regenerado FCC; no obstante, el reciclaje no representa una solución real a la problemática ambiental ya que a largo plazo se convertirá nuevamente en residuos. Estos resultados se corroboran a su vez con lo expresado por Jeswani et al. (2021, p. 3) quienes sostienen que, en el reciclaje mecánico de plásticos se obtiene HdC escasas ya que en este tipo de tratamiento el análisis se centra en la gestión de desechos sin considerar la recuperación de materiales para producir productos con un valor agregado.

CONCLUSIONES

- El proceso de regeneración del catalizador en la presente investigación se efectuó en base a una condición de operación determinada por la fuente de alimentación para el proceso a escala industrial, mismo que corresponde a dos casos de análisis 1.8 toneladas y 325 kg de catalizador al día; en base a dicha característica se seleccionaron diversos equipos con una potencia específica; además se trabajó a una temperatura de secado de 140 y 120°C y calcinación en un rango de 100 a 700°C, a un tiempo de secado de 2.3 y 2.6 horas, tiempo de calcinación 20.5 horas, con una velocidad de agitación de 300 rpm; en definitiva las condiciones de operación como tiempo, temperatura, velocidad y pérdidas energéticas se mantienen constantes de forma independiente al volumen de operación.
- Tras los cálculos y análisis bibliográfico respectivo se estimó un consumo energético total de 4350.92 kWh en el caso de 1.8 toneladas de catalizador, de los cuales 103.5 kWh corresponden al pretratamiento, 602.59 kWh se derivan del tratamiento químico, 1845 kWh provienen del tratamiento térmico y del sistema de reciclado de etanol corresponde 1799.83 kWh. Por otro lado, para el sistema de 325 kg de catalizador se determinó un consumo energético en el pretratamiento de 14.49 kWh, en la fase del tratamiento químico se consumen 53.88 kWh, en la etapa térmica se reporta un valor de 258.3 kWh y finalmente, en el proceso de reciclaje se evidencia un consumo energético de 360 kWh; en conjunto para el sistema de menor volumen se estableció un consumo global de energía de 686.67kWh.
- Una vez analizados los aportes individuales a la huella de carbono global de cada uno de los tratamientos del proceso de regeneración de catalizador, se determina que el sistema de reciclado de etanol es el que más aporta, puesto que en el caso de 1.8 toneladas de catalizador deriva un valor de 701.93 kg CO₂eq y 140.4 kg CO₂eq para el procedimiento con 325.25 kg de catalizador; no obstante, en caso de la inexistencia del sistema de reciclado que fue incorporado como una alternativa de ahorro del solvente, el tratamiento térmico constituye el de mayor contribución a este índice, pues arroja valores de 719.5 y 101 kg CO₂eq respectivamente. En virtud de los resultados obtenidos se concluye que el sistema de reciclado de etanol a pesar de representar un ahorro económico supone un gasto energético considerable que representa una contribución significativa de CO₂ a la atmósfera, por tanto, su implementación no es viable.

RECOMENDACIONES

- Resulta importante que la búsqueda de los equipos sea minuciosa considerando las condiciones de operación para que los datos de potencia sean los más cercanos a la realidad y, por ende, el resultado de huella de carbono sea confiable.
- A pesar que los equipos empleados en el proceso de regeneración para 1.8 toneladas de catalizador se pueden utilizar para el proceso de regeneración para 325.25 kg de catalizador se recomienda seleccionar otros con menor capacidad para así evitar que la huella de carbono sea mayor innecesariamente.
- Es recomendable realizar más investigaciones en este ámbito debido a que existe escasez de información no solo a nivel nacional si no internacional, de esta manera se puedan comparar resultados y verificar cuan viable realmente es el proceso.
- La huella de carbono del reciclado de etanol propuesto en la investigación es elevada en comparación del proceso de regeneración, es así que es importante que se analicen otras propuestas de reciclado de etanol para que este no sea desechado y que la huella de carbono sea menor.

BIBLIOGRAFÍA

AMAR, S.; et al. "Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos". *Ingeniería y Desarrollo* [en línea], 2019, 37(2), pp. 307-326. [Consulta: 14 julio 2023]. ISSN 0122-3461. Disponible en: DOI 10.14482/inde.37.2.1285.

ANAYA, A.; & PEDROZA, H. "Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina". *Tecnología, Ciencia, Educación* [en línea], 2008, 23(1), pp. 31-39. [Consulta: 14 julio 2023]. ISSN 0186-6036. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48223105>.

ANDRADE, L. Regeneración de catalizadores agotados de la unidad de cracking catalítico fluidizado (FCC) de refinería, para su utilización en pirólisis catalítica (Trabajo de titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador. 2020. pp. 2-92.

ARISTIZÁBAL, C.E.; et al. "Análisis del ciclo de vida y cálculo de la huella de Carbono para un proceso de reciclaje de botellas PET en Medellín (ANT)". *Producción + Limpia* [en línea], 2020, 15(1), pp. 7-24. [Consulta: 23 julio 2023]. ISSN 1909-0455. Disponible en: DOI 10.22507/pml.v15n1a1.

ARMADILLO, C. *Clasificación y aplicaciones de los plásticos (Termoplásticos, Termoestables y Elastómeros)* [blog]. 2021. [Consulta: 28 junio 2023]. Disponible en: <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-de-san-luis-potosi/mecanica-de-materiales/clasificacion-y-aplicaciones-de-los-plasticos-termoplasticos-termoestables-y-elastomeros/17196052>.

BARRERA, A.L.B.; et al. "Recuperación de níquel, vanadio y molibdeno del catalizador agotado de la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC)". *Revista Politécnica*, Vol. 36, n°. 2 (2015) (Ecuador). pp. 55-69. ISSN 2477-8990.

BARZOLA, A. Cálculo de la Huella de Carbono del proceso de pirólisis de residuos plásticos (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador. 2023. pp. 1-88.

BELTRAN, M.; & MARCILLA, A. *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*. Barcelona-España: Universidad de Alicante, 2012. pp. 150-170.

BENABITHE, Z.Z.; et al. "Caso de estudio de la destilación etanol-agua en operación continua y discontinua y su simulación con ecuaciones cúbicas de estado y modelos de actividad". *TecnoLógicas*. Vol. 23, n°. 49 (2020) (Colombia). pp. 201-220.

BUSTAMANTE, B.P. "La degradación de los plásticos". *Revista Universidad EAFIT*. Vol. 30, n°. 94 (2003). pp. 204-217.

CARRERA, H. Evaluación y caracterización del catalizador del proceso de craqueo catalítico fluidizado (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química, Quito, Ecuador. 2013. pp. 1-114.

CFG. *Agitadores industriales* [blog]. 2020. [Consulta: 30 junio 2023]. Disponible en: https://cdn.cfgmixers.com/wp-content/uploads/2020/12/30171225/Brochure_General_CFG.pdf.

COMISIÓN TÉCNICA DE DETERMINACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN DE GASES EFECTO INVERNADERO. *Factor de emisión de CO2 del Sistema Nacional Interconectado* [blog]. 2019. [Consulta: 30 junio 2023]. Disponible en: https://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2020/11/factor_de_emision_de_co_2_del_sistema_nacional_interconectado_de_ecuador_-_informe_2019.pdf.

DEAKRO, M. *Equipos de aireación y accesorios eléctricos* [blog]. 2022. [Consulta: 30 junio 2023]. Disponible en: [https://s946a3e7a326de9e3.jimcontent.com/download/version/1565553359/module/8186590176/name/Blower%](https://s946a3e7a326de9e3.jimcontent.com/download/version/1565553359/module/8186590176/name/Blower%20).

DOMÉNECH, J.; et al. "Estándares 2010 de huella de carbono MC3". *Santiago Compostela*, Vol. 42, n°. 3 (2010) (España). pp. 70-85.

ELGEGREN, M.; et al. "Reciclaje químico de desechos plásticos". *Revista de la Sociedad Química del Perú* [en línea], 2012, 78(2), pp. 1-20. [Consulta: 2 julio 2023]. ISSN 1810-634X. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1810-634X2012000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

ESPÍNDOLA, C.; & VALDERRAMA, O. "Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas". *Información tecnológica*, Vol. 23, n°. 1 (2012). pp. 135-150. ISSN 0718-0764.

GARY, J.H.; & HANDWERK, G.E. *Refino de petróleo. Tecnología y economía*. Madrid-España: Reverte, 1980, pp. 275-308.

GOBIERNO VASCO. *Metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero* [blog]. 2013. [Consulta: 3 julio 2023]. Disponible en: https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/7metodologias_gei/es_def/adjuntos/7METODOLOGIAS.pdf.

GONZALEZ, J. Modelado de un sistema de Fluid Catalytic Cracking (FCC) (Trabajo de titulación) (Tesis de máster). Universidad de Valladolid, Facultad de Ingeniería de Procesos, Valladolid, España. 2014. pp. 1-52.

GUANOQUIZA, G. Recuperación de metales pesados del catalizador agotado de la unidad de hidrotratamiento de la refinería estatal de esmeraldas, para el uso en la impregnación de catalizadores soportados Trabajo de Titulación) (Tesis de maestría). Universidad de las Fuerzas Armadas, Facultad de Ciencia de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador. 2018. pp. 1-122.

HERNÁNDEZ, R. Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados (Trabajo de Titulación) (Tesis doctoral) [en línea]. Universidad de Alicante, Facultad de Ciencias, Alicante, España. 2008. pp. 1-150. [Consulta: 2023-07-15]. Disponible en: <https://www.cervantesvirtual.com/obra/evaluacion-de-la-pirolisis-termica-y-catalitica-de-polietileno-en-lecho-fluidizado-como-tecnica-de-reciclado-influencia-de-las-variables-sobre-los-productos-generados--0/>.

JANCOVICI, J. "El Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG)". *ClimatePartner* [en línea], 2022, 52(1), pp. 26-45. [Consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: <https://www.climatepartner.com/es/news-insights/glosario/el-protocolo-de-gases-de-efecto-invernadero-ghg>.

JESWANI, H.; et al. "Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery". *Science of The Total Environment* [en línea], 2021, 769(2), pp. 265-320. [Consulta: 29 julio 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720380141>.

KING, C.J. *Procesos de separación*. Madrid-España: Reverte, 2021, pp. 401-480.

KLUG, M. "Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa". *Revista Politécnica*, Vol. 26, n°2 (2012). pp. 80-95. ISSN 1012-3946.

LARRAHONDO, P.A.R. *Ciclo de vida de los productos. Diseño y análisis para la innovación sostenible*. Bogotá-Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2021, pp. 15-35.

MAIDEL, M.; et al. "Recycling lanthanum from effluents of elektrokinetic treatment of FCC spent catalyst, using a selective precipitation technique". *Separation and Purification Technology*, vol. 210, n°1 (2021). pp. 40-67. ISSN 1383-5866.

MANCHENO, M.; et al. "Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis". *La Granja* [en línea], 2016, 23(1), pp. 158-168. [Consulta: 2 julio 2023]. ISSN 1390-8596. Disponible en: <http://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/23.2016.06>.

MARRIAGA, N. "Indicadores de desempeño de la destilación de bioetanol". *Dyna* [en línea], 2018, 76(159), pp. 12-46. [Consulta: 15 julio 2023]. ISSN 0012-7353. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0012-73532009000300009&lng=e&nrm=iso&tlng=es.

MASTRAL, F.J.; et al. "Pyrolysis of high-density polyethylene in a fluidised bed reactor. Influence of the temperature and residence time". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 63, n° 1 (2002). pp. 65-115. ISSN 0165-2370.

MENDOZA, D.F.R. Simulación de un Proceso de Pirólisis de Plásticos empleando ASPEN – HYSYS (Trabajo de Titulación) (Tesis doctoral). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Escuela de Ingenieros Industriales y Civiles, Gran Canaria, España. 2015. pp. 1-188.

MERCADO, R.; et al. "Balances de Materia y Energía simplificados, aplicados a un proceso de craqueo catalítico de petróleo". *Ingeniería Química*, Vol. 20, n° 15 (2009). pp. 28-52. DOI 10.1016/S0187-893X(18)30050-8. 2009

MITCHELL, M.M.; et al. "Residual Feed Cracking Catalysts". *Studies in Surface Science and Catalysis* [en línea], 2019, 76(15), pp. 293-338. [Consulta: 2 julio 2023]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016729910863832X>. 1993

MONTEROS, K. *Huella de Carbono bbva noticias* [blog]. 2021. [Consulta: 27 junio 2023]. Disponible en: <https://www.bbva.com/es/es/sostenibilidad/como-se-calcula-la-huella-de-carbono/>.

MOSQUERA, A. Obtención de hormigón y mortero a partir del catalizador agotado de la unidad de craqueo catalítico fluidizado de la refinería esmeraldas como adición puzolánica (Trabajo de Titulación) (Tesis doctoral) [en línea]. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ciencias, Quito, Ecuador. 2016. pp. 1-120. [Consulta: 2023-07-20]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15090/1/CD-6902.pdf>. 2016

NABERTHERM. *Hornos de Laboratorio* [blog]. 2021. [Consulta: 3 julio 2023]. Disponible en: https://nabertherm.com/sites/default/files/2022-04/laboratory_spanish_0.pdf.

NAVARRO, R. Pirólisis catalítica de polietileno. Estudio de la evolución de la distribución de productos y desactivación del catalizador (Trabajo de Titulación) (Tesis doctoral). Universidad de Alicante, Facultad de Ciencias, Alicante, España. 2007. pp. 1-293.

NEWALKAR, G.; et al. "Effect of Temperature, Pressure, and Residence Time on Pyrolysis of Pine in an Entrained Flow Reactor". *Energy & Fuels*. Vol. 28, nº. 8 (2014). pp. 85-108.

PALMAY, P. Revalorización energética de residuos plásticos urbanos mediante pirólisis: Estudio termodinámico, experimentación, aplicación y usos (Trabajo de Titulación) (Tesis doctoral) [en línea]. Universitat Rovira i Virgili, España. 2022. pp. 1-180. [Consulta: 2023-07-25]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/675657>. 2022

PALMAY, P.; et al. "Production and Analysis of the Physicochemical Properties of the Pyrolytic Oil Obtained from Pyrolysis of Different Thermoplastics and Plastic Mixtures". *Molecules*. Vol. 27, nº. 10 (2022). pp. 26-62.

PANDEY, D.; et al. "Carbon footprint: current methods of estimation". *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol. 178, nº. 4 (2011). pp. 228-245.

PORTILLO, R.E.; et al. "Análisis de consumos y costos eléctricos de producción por producto en una industria licorera". *Producción + Limpia* [en línea], 2020, 15(1), pp. 32-49. [Consulta: 23 julio 2023]. ISSN 2323-0703. Disponible en: DOI 10.22507/pml.v15n1a4. 2020.

RAMOS, W.; et al. "Pirólisis catalítica de cubrebocas de polipropileno desechables para la obtención de combustibles líquidos". *Información tecnológica* [en línea], 2023, 34(1), pp. 1-25. [Consulta: 24 julio 2023]. ISSN 0718-0764. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S071807642023000100001&lng=es&nrm=iso&tlng=es. 2023

SAAVEDRA, B.E. 2020. Huella de carbono: emisiones de GEI por uso del sistema de iluminación de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú. *TECNIA* [en línea], vol. 30, no. 1, [consulta: 21 julio 2023]. ISSN 2309-0413. Disponible en: <http://revistas.uni.edu.pe/index.php/tecnia/article/view/827>. 2020

TEFSA. *Filtros de vacío* [blog]. 2021. [Consulta: 19 julio 2023]. Disponible en: https://gruptefsa.com/filtros_de_vacio/08-Filtros%20vacio%CC%81o.pdf. 2021

TOAPANTA, G. Recuperación de metales pesados del catalizador agotado de la unidad de hidrotratamiento (HDT) de la refinería estatal de esmeraldas (REE), para el uso en la impregnación de catalizadores soportados (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas, Facultad de Ciencias, Latacunga, Ecuador. 2018. pp. 1-112.

TORRES, C.; & TORRES, J. "Using spent fluid catalytic cracking (FCC) catalyst as pozzolanic addition - a review". *Ingeniería e Investigación* [en línea], 2010, 30(2), pp. 40-48. [Consulta: 2 julio 2023]. ISSN 2248-8723. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingevinv/article/view/15728>. 2010

TOWLER, G.; & SINNOTT, R. *Diseño en ingeniería química*. Madrid-España: Reverte, 2019, pp. 265-330.

TUR, J. "Ecuador reduce en un 5% la meta de producción petrolera". *Primicias* [en línea], 2023. [Consulta: 4 julio 2023]. Disponible en: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/produccion-petroleo-reduccion-ecuador/>.

VALDERRAMA, J.; et al. "Huella de Carbono, un Concepto que no puede estar Ausente en Cursos de Ingeniería y Ciencias". *Formación universitaria*, Vol. 4, nº. 3 (2011). pp. 102-130. ISSN 0718-5006.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, WORLD RESOURCES INSTITUTE y SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. *Protocolo de gases efecto invernadero.* 2020. pp. 13-23.

WORLD RESOURCES INSTITUTE y WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. *Product life cycle accounting and reporting standard.* 2011. pp.1-40.

ZAMBRANO, A.S. Reciclaje químico de plástico mediante pirólisis catalítica usando un catalizador regenerado (Trabajo de Titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador. 2022. pp. 1-90.



1761-DBRA-UPT-2023

ANEXOS

ANEXO A: CÁLCULO DE CANTIDAD DE CATALIZADOR AGOTADO A LA ENTRADA DE CADA EQUIPO DEL PROCESO DE REGENERACIÓN PARA 1713.88 kg DE CATALIZADOR REGENERADO

- Cantidad en entrada de calcinación

$$Cantidad_{inicial} = \frac{1713.88 \text{ kg}}{1 - \frac{0.779 \%}{100}}$$

$$Cantidad_{inicial} = 1727.33 \text{ kg}$$

- Cantidad en entrada de filtrado

$$Cantidad_{inicial} = \frac{1727.33 \text{ kg}}{1 - \frac{0.0458 \%}{100}}$$

$$Cantidad_{inicial} = 1728.12 \text{ kg}$$

- Cantidad en entrada de agitado

$$Cantidad_{inicial} = \frac{1728.12 \text{ kg}}{1 - \frac{3.877 \%}{100}}$$

$$Cantidad_{inicial} = 1797.82 \text{ kg}$$

- Cantidad en entrada de secado

$$Cantidad_{inicial} = \frac{1797.82 \text{ kg}}{1 - \frac{0.5079 \%}{100}}$$

$$Cantidad_{inicial} = 1807 \text{ kg}$$

ANEXO B: CÁLCULO DE CANTIDAD DE CATALIZADOR AGOTADO A LA ENTRADA DE CADA EQUIPO DEL PROCESO DE REGENERACIÓN PARA 308.5 kg DE CATALIZADOR REGENERADO

- Cantidad en entrada de calcinación

$$Cantidad_{inicial} = \frac{308.5 \text{ kg}}{1 - \frac{0.779 \%}{100}}$$

$$Cantidad_{inicial} = 310.92 \text{ kg}$$

- Cantidad en entrada de filtrado

$$Cantidad_{inicial} = \frac{310.92 \text{ kg}}{1 - \frac{0.0458 \%}{100}}$$

$$Cantidad_{inicial} = 311.06 \text{ kg}$$

- Cantidad en entrada de agitado

$$Cantidad_{inicial} = \frac{311.06 \text{ kg}}{1 - \frac{3.877 \%}{100}}$$

$$Cantidad_{inicial} = 323.60 \text{ kg}$$

- Cantidad en entrada de secado

$$Cantidad_{inicial} = \frac{323.60 \text{ kg}}{1 - \frac{0.5079 \%}{100}}$$

$$Cantidad_{inicial} = 325.25 \text{ kg}$$

ANEXO C: CÁLCULO DE CAUDAL DE AIRE REQUERIDO PARA LA SELECCIÓN DEL BLOWER

BLOWER PARA FLUJO DE 10 m³/h

$$m_{air} = \frac{(10 \text{ m}^3/\text{h} * 2.46 \text{ J/kg}^\circ\text{C} * 58^\circ\text{C})_{etanol}}{(1.005 \text{ J/kg}^\circ\text{C} * 20^\circ\text{C})_{air}}$$

$$m_{air} = 71 \text{ m}^3/\text{h}$$

BLOWER PARA FLUJO DE 4 m³/h

$$m_{air} = \frac{(4 \text{ m}^3/\text{h} * 2.46 \text{ J/kg}^\circ\text{C} * 58^\circ\text{C})_{etanol}}{(1.005 \text{ J/kg}^\circ\text{C} * 20^\circ\text{C})_{air}}$$

$$m_{air} = 28.39 \text{ m}^3/\text{h}$$

ANEXO D: CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS EQUIPOS PARA 1.8 TONELADAS DE CATALIZADOR AL DÍA

- Consumo energético del pretratamiento

Secado

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= P * t \\ \text{Consumo} &= 45 \text{ kW} * 2.30 \text{ h} \\ \text{Consumo} &= 103.5 \text{ kWh} \end{aligned}$$

- Consumo energético del tratamiento químico

Mezclado

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= P * t \\ \text{Consumo} &= 40 \text{ kW} * 12 \text{ h} \\ \text{Consumo} &= 480 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Filtrado

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= P * t \\ \text{Consumo} &= 5.59 \text{ kW} * 1 \text{ h} \\ \text{Consumo} &= 5.59 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Secado

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= P * t \\ \text{Consumo} &= 45 \text{ kW} * 2.60 \text{ h} \\ \text{Consumo} &= 117 \text{ kWh} \end{aligned}$$

- Consumo energético del tratamiento térmico

Calcinado

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= P * t \\ \text{Consumo} &= 90 \text{ kW} * 20.5 \text{ h} \\ \text{Consumo} &= 1845 \text{ kWh} \end{aligned}$$

- Consumo energético del reciclado de etanol

Columna de destilación

Caudal en kL/d

$$20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ kL}}{1000 \text{ L}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} = 480 \frac{\text{kL}}{\text{d}}$$

$$\text{Potencia para } 480 \text{ kL/d} = \frac{480 \frac{\text{kL}}{\text{d}} * 0.97 \text{ kW}}{1 \frac{\text{kL}}{\text{d}}} = 465.6 \text{ kW}$$

Consumo energético

$$\text{Consumo} = P * t$$

$$\text{Consumo} = 232.8 \text{ kW} * 1 \text{ h}$$

$$\text{Consumo} = 465.6 \text{ kWh}$$

Reboiler

Potencia reboiler

$$\text{Potencia} = \frac{20000 \text{ L} * 1 \text{ kW}}{15 \text{ L}} = \text{kW}$$

$$\text{Consumo} = P * t$$

$$\text{Consumo} = 1333.33 \text{ kW} * 1 \text{ h}$$

$$\text{Consumo} = 1333.33 \text{ kWh}$$

Blower

$$\text{Consumo} = P * t$$

$$\text{Consumo} = 0.450 \text{ kW} * 2 \text{ h}$$

$$\text{Consumo} = 0.9 \text{ kWh}$$

- Consumo energético total sin reciclado de etanol

$$CT = 103.5 \text{ kWh} + 480 \text{ kWh} + 5.59 \text{ kWh} + 117 \text{ kWh} + 1845 \text{ kWh}$$

$$CT = 2551.1 \text{ kWh}$$

- Consumo energético total con reciclado de etanol

$$CT = 103.5 \text{ kWh} + 480 \text{ kWh} + 5.59 \text{ kWh} + 117 \text{ kWh} + 1845 \text{ kWh} + 465.6 \text{ kWh} \\ + 1333.33 \text{ kWh} + 0.9 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo} = 4350.9 \text{ kWh}$$

**ANEXO E: CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS EQUIPOS PARA 325.25
kg DE CATALIZADOR AL DÍA**

- Consumo energético del pretratamiento

Secado

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= P * t \\ \text{Consumo} &= 6.3 \text{ kW} * 2.30 \text{ h} \\ \text{Consumo} &= 14.49 \text{ kWh} \end{aligned}$$

- Consumo energético del tratamiento químico

Mezclado

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= P * t \\ \text{Consumo} &= 3 \text{ kW} * 12 \text{ h} \\ \text{Consumo} &= 36 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Filtrado

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= P * t \\ \text{Consumo} &= 1.5 \text{ kW} * 1 \text{ h} \\ \text{Consumo} &= 1.5 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Secado

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= P * t \\ \text{Consumo} &= 6.3 \text{ kW} * 2.60 \text{ h} \\ \text{Consumo} &= 16.38 \text{ kWh} \end{aligned}$$

- Consumo energético del tratamiento térmico

Calcinado

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= P * t \\ \text{Consumo} &= 12.6 \text{ kW} * 20.5 \text{ h} \\ \text{Consumo} &= 258.3 \text{ kWh} \end{aligned}$$

- Consumo energético del reciclado de etanol

Columna de destilación

Caudal en kL/d

$$4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ kL}}{1000 \text{ L}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} = 96 \frac{\text{kL}}{\text{d}}$$

$$Potencia \text{ para } 96 \text{ kL/d} = \frac{96 \frac{\text{kL}}{\text{d}} * 0.97 \text{ kW}}{1 \frac{\text{kL}}{\text{d}}} = 93.12 \text{ kW}$$

Consumo energético

$$Consumo = P * t$$

$$Consumo = 93.12 \text{ kW} * 1 \text{ h}$$

$$Consumo = 93.12 \text{ kWh}$$

Reboiler

Potencia reboiler

$$Potencia = \frac{4000 \text{ L} * 1 \text{ kW}}{15 \text{ L}} = 266.66 \text{ kW}$$

$$Consumo = P * t$$

$$Consumo = 266.66 \text{ kW} * 1 \text{ h}$$

$$Consumo = 266.66 \text{ kWh}$$

Blower

$$Consumo = P * t$$

$$Consumo = 0.250 \text{ kW} * 1 \text{ h}$$

$$Consumo = 0.250 \text{ kWh}$$

- Consumo energético total sin reciclado de etanol

$$CT = 14.49 \text{ kWh} + 36 \text{ kWh} + 1.5 \text{ kWh} + 16.38 \text{ kWh} + 258.3 \text{ kWh}$$

$$CT = 326.67 \text{ kWh}$$

- Consumo energético total con reciclado de etanol

$$CT = 14.49 \text{ kWh} + 36 \text{ kWh} + 1.5 \text{ kWh} + 16.38 \text{ kWh} + 258.3 \text{ kWh} + 93.12 \text{ kWh} \\ + 266.66 \text{ kWh} + 0.250 \text{ kWh}$$

$$Consumo = 686.7 \text{ kWh}$$

ANEXO F: CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO PARA 1.8 TONELADAS DE CATALIZADOR AL DÍA

- Huella de carbono del pretratamiento

Secado

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 103.5 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 40.36 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

- Huella de carbono del tratamiento químico

Mezclado

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 480 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 187.2 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

Filtrado

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 5.59 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 2.18 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

Secado

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 117 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 45.63 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

- Huella de carbono del tratamiento térmico

Calcinado

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 1845 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 719.5 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

- Huella de carbono del reciclado de etanol

Columna de destilación

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 465.6 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 181.58 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

Reboiler

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 1333.33 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 520 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

Blower

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 0.9 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 0.35 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

- Huella de carbono sin reciclado de etanol

$$\textit{Huella de carbono total} = 40.36 \textit{ kg CO}_2\textit{eq} + 235 \textit{ kg CO}_2\textit{eq} + 719.5 \textit{ kg CO}_2\textit{eq}$$

$$\textit{Huella de carbono total} = 994.86 \textit{ kg CO}_2\textit{eq}$$

- Huella de carbono con reciclado de etanol

Huella de carbono total

$$= 40.36 \textit{ kg CO}_2\textit{eq} + 235 \textit{ kg CO}_2\textit{eq} + 719.5 \textit{ kg CO}_2\textit{eq} + 701.93 \textit{ kg CO}_2\textit{eq}$$

$$\textit{Huella de carbono total} = 1696.8 \textit{ kg CO}_2\textit{eq}$$

ANEXO G: CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO PARA 325.25 kg DE CATALIZADOR AL DÍA

- Huella de carbono del pretratamiento

Secado

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 14.49 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 5.65 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

- Huella de carbono del tratamiento químico

Mezclado

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 36 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 14.04 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

Filtrado

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 1.5 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 0.58 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

Secado

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 16.38 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 6.39 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

- Huella de carbono del tratamiento térmico

Calcinado

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 258.3 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 101 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

- Huella de carbono del reciclado de etanol

Columna de destilación

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 93.12 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 36.32 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

Reboiler

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 266.66 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 104 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

Blower

$$\text{Huella de carbono} = DA * FE$$

$$\text{Huella de carbono} = 0.25 \text{ kWh} * 0.39 \frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Huella de carbono} = 0.097 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

- Huella de carbono total sin reciclado de etanol

$$\textit{Huella de carbono total} = 5.65 \textit{ kg CO}_2\textit{eq} + 21.01 \textit{ kg CO}_2\textit{eq} + 101 \textit{ kg CO}_2\textit{eq}$$

$$\textit{Huella de carbono total} = 127.66 \textit{ kg CO}_2\textit{eq}$$

- Huella de carbono total con reciclado de etanol

Huella de carbono total

$$= 5.65 \textit{ kg CO}_2\textit{eq} + 21.01 \textit{ kg CO}_2\textit{eq} + 101 \textit{ kg CO}_2\textit{eq} + 140.4 \textit{ kg CO}_2\textit{eq}$$

$$\textit{Huella de carbono total} = 268.06 \textit{ kg CO}_2\textit{eq}$$

ANEXO H: GUIA PARA CALCULAR LA HUELLA DE CARBONO

Los puntos de vista que se expresan en esta publicación no reflejan necesariamente los de FOESA o el de los colaboradores consultados cuya relación no es vinculante con el proyecto que enmarca esta guía.
Esta publicación ha sido posible gracias a la colaboración de la Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.



Publicado por: Fundación Observatorio Español de Acuicultura, Madrid.



Derechos reservados: © 2013 Fundación Observatorio Español de Acuicultura
Se autoriza la reproducción de esta publicación con fines educativos y otros fines no comerciales sin permiso escrito previo de parte de quien detenta los derechos de autor con tal de que se mencione la fuente.

Citación: FOESA (2013). Guía para el cálculo de la huella de carbono en productos acuícolas. FOESA, Madrid, España. 64 páginas.

Diseño, edición y maquetación: Gonzalo Used

Fotografía portada y pg.8: Staff, Santa Barbara Coastal Long Term Ecological Research project

Disponible en:

www.fundacionoesa.es

También existe a disposición un catálogo de las publicaciones de FOESA en:

www.fundacionoesa.es/publicaciones



Aviso Legal: Los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización.



Edita:

© Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Secretaría General Técnica

Centro de Publicaciones

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

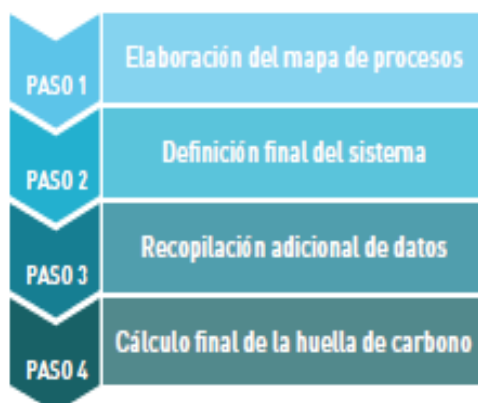
<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

NIPO: 280-13-248-1

4. PASOS PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO DEL PRODUCTO

Una vez que la empresa u organización decide dar el paso para calcular la huella de carbono de uno o varios de sus productos, esta deberá definir los objetivos y alcances de su estudio, realizar un análisis de inventario de los datos, clasificarlos y caracterizar los impactos para su posterior interpretación. El dato último obtenido de la huella de carbono puede tener varias utilidades: aplicaciones directas al producto, establecer mejoras ambientales a través de planes estratégicos, políticas públicas, etc.

Por lo tanto, se deben seguir los siguientes pasos anteriormente mostrados y definidos por la PAS 2050, estos son:



4.1 Elaboración del mapa de procesos

Se elabora un mapa de procesos del ciclo de vida del producto, desde las materias primas hasta el fin de la vida útil (dependiendo del alcance a elegir) del producto, incluyendo todos los materiales, la energía y los residuos generados (Fig.7).

Con este mapa se pretende identificar todos los materiales, actividades y procesos que forman parte de la producción del producto. Esto conlleva un proceso de brainstorming (tormenta de ideas) que, posteriormente, servirá como herramienta de gran utilidad a lo largo de todo el ejercicio del cálculo sirviendo como referencia gráfica y guía tanto para la recopilación de datos como para el propio cálculo.

Se comienza separando los componentes del producto seleccionado (materias primas, empaquetado, etc.). Hay que centrarse primero en las entradas más significativas e identificar sus respectivas entradas, procesos de fabricación, condiciones de almacenamiento y requisitos de transporte. La unidad funcional es aquella a la que se van a referir las entradas

- Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol2.html>
- Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpqaum_es.html
- IPCC 4th Assessment Report, 2007: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm

Inventario Nacional de Emisiones de gases de efecto invernadero e información adicional. Años 1990-2011.

- Anexo 8 del Inventario Nacional de Emisiones de España. Años 1990-2009: "Factores de emisión del CO₂ y PCI de los combustibles": [http://www20.gencat.cat/docs/canviclimatic/Home/Comerc%20de%20drets%20demissio/Procediment%20per%20al%20tramit%20dautoritzacio/Factors%20demissio/Documents/Anexo%20.-%20Factores%20de%20emisi%C3%B3n%20\(2011\).pdf](http://www20.gencat.cat/docs/canviclimatic/Home/Comerc%20de%20drets%20demissio/Procediment%20per%20al%20tramit%20dautoritzacio/Factors%20demissio/Documents/Anexo%20.-%20Factores%20de%20emisi%C3%B3n%20(2011).pdf)

Ministerio de Medio Ambiente, 2007:

- Análisis de la Huella Ecológica en España, 2007. Minuartia Estudis Ambientals en colaboración con Estudio MC e Instituto de Economía Pública. Universidad del País Vasco.

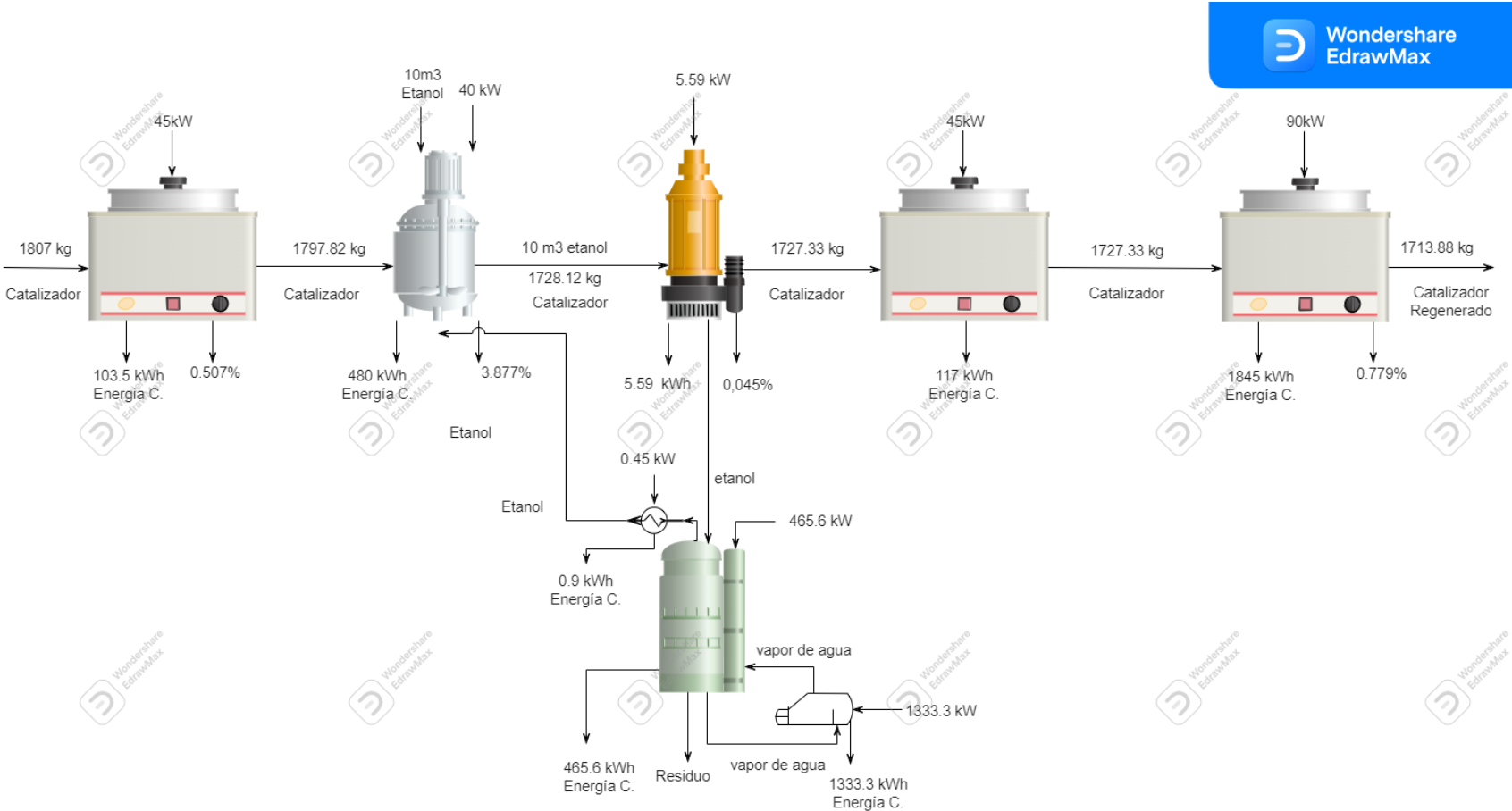
Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008

- Análisis de la Huella Ecológica en España, 2008. Minuartia Estudis Ambientals en colaboración con Estudio MC e Instituto de Economía Pública. Universidad del País Vasco.

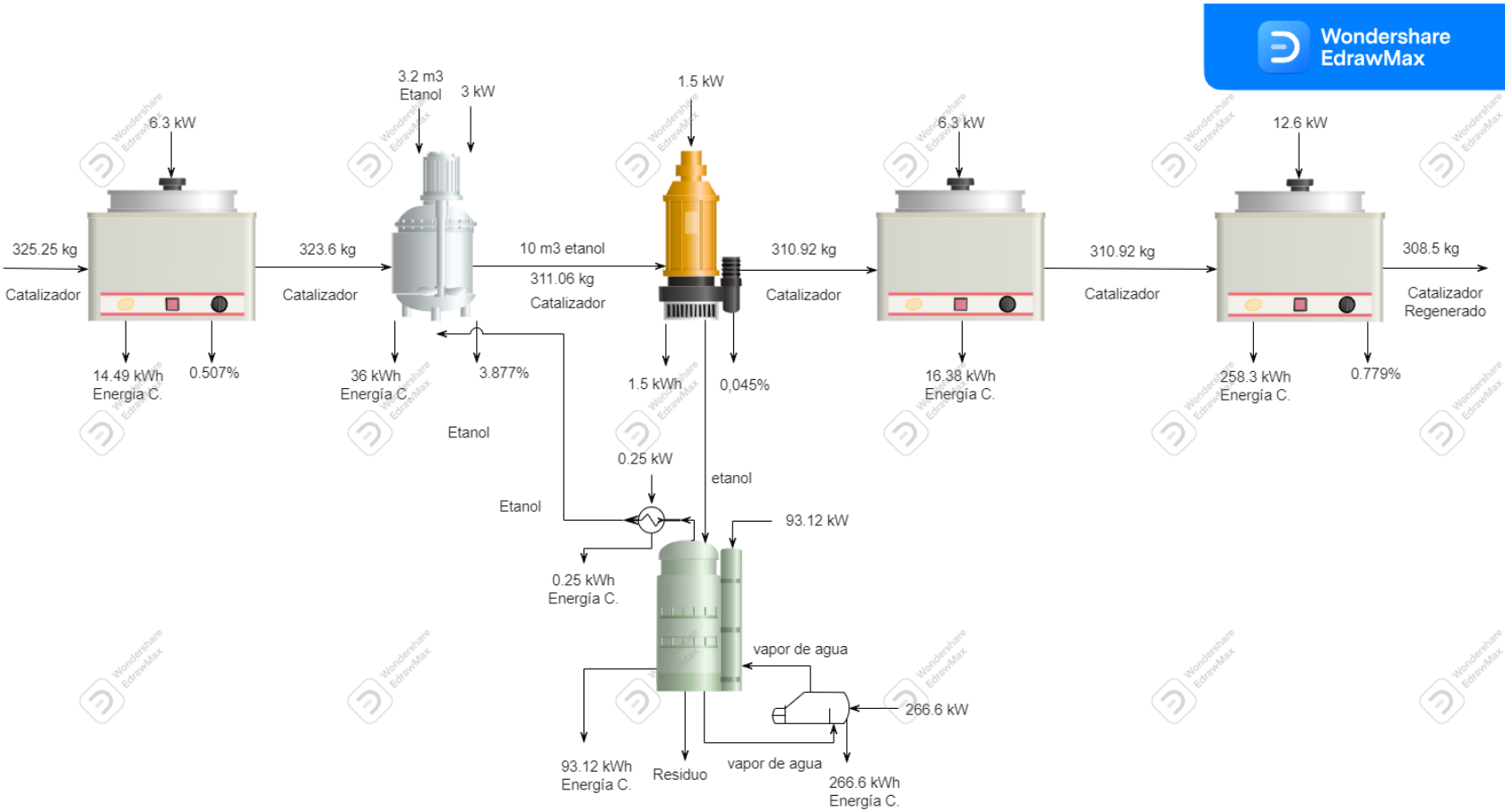
Oficina Catalana del Canvi Climàtic

- Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Versión 2011 (marzo 2012). Generalitat de Catalunya. Comisión Interdepartamental del Cambio Climático.

ANEXO I: DIAGRAMA DE PROCESO PARA LA REGENERACIÓN DE 1.8 TONELADAS DE CATALIZADOR AGOTADO



ANEXO J: DIAGRAMA DE PROCESO PARA LA REGENERACIÓN DE 325.25 kg DE CATALIZADOR AGOTADO





esPOCH

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 27 / 10 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Gina Fransheska Vera Hidalgo
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería en Biotecnología Ambiental
Título a optar: Ingeniera en Biotecnología Ambiental
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

1761-DBRA-UPT-2023

