

## **CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA PRODUCCIÓN DE PLASTICOMBUSTIBLES**

Por: Felipe Calderón Sáenz  
Director General  
Dr. Calderón Laboratorios Ltda.  
Bogotá, Colombia  
[calderon@drcalderonlabs.com](mailto:calderon@drcalderonlabs.com)

Revs. Feb 25 de 2021; Mzo 3 de 2021; Nov 29 de 2021

### **INTRODUCCIÓN**

En el presente documento se realizará el cálculo de la Huella de Carbono generada en la producción de Plasticcombustibles, tal como se ha venido desarrollando en el proyecto a nivel de Planta Piloto en la Ciudad de Funza, durante los años 2013 a 2019

### **METODOLOGÍA Y ALCANCE**

Para el cálculo de la huella de Carbono, tendremos en cuenta y basaremos nuestros cálculos en el estado actual de la tecnología y su implementación en la planta piloto. Esta es una planta discontinua que opera por Batches, con una capacidad de 250 kg de plástico por batch, (1 Batch = 7 horas de actividad más 4 horas de enfriamiento), con pérdida de todo el calor de enfriamiento y sin recuperación de calor sobrante durante el proceso y una emisión de GEI consistentes en gases de combustión con exceso de oxígeno, a una temperatura comprendida entre 100 y 400 °C, según el momento dentro del ciclo.

Cabe resaltar que, en este proceso, a escala piloto, el consumo de combustibles para sostener el proceso representa aproximadamente el 34 % del material procesado, por las pérdidas e ineficiencias típicas de los procesos Batch ya anotados. En procesos de mayor tamaño, continuos o semicontinuos con recuperación de calor secundario, este consumo puede bajar hasta el 20 % del material procesado.

La metodología para utilizar será la de cálculo de los kgs equivalentes de CO<sub>2</sub> emitidos, correspondientes al “Alcance 1” o sea aquellos productos de combustión directa utilizados como combustible en el proceso y los correspondientes al “Alcance 2” o sea CO<sub>2</sub> equivalente de otras fuentes energéticas utilizadas en el proceso. En este caso únicamente la Energía Eléctrica.

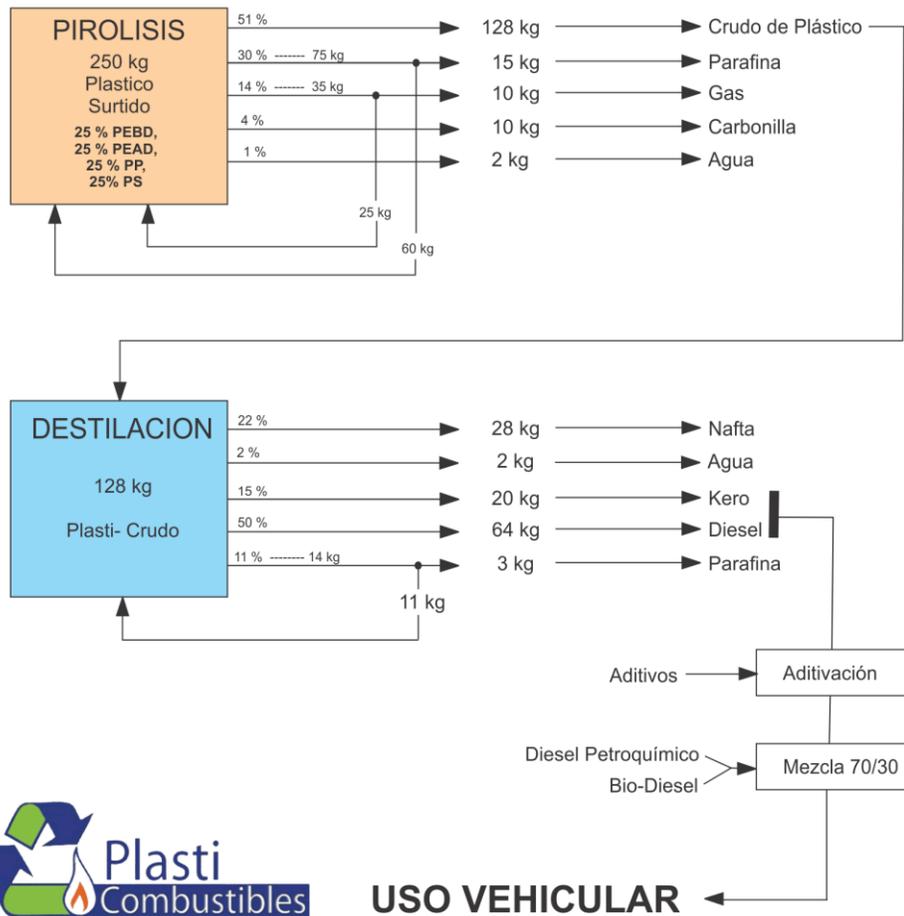
No se tendrá en cuenta los kgs de CO<sub>2</sub> equivalentes correspondientes al “Alcance 3” o sea aquellos emitidos en labores de transporte y acopio del plástico, ya que estos pertenecen al “Up Stream” del proceso y no forman parte de proceso de Plasticcombustibles. Es decir, este cálculo arranca desde el momento en que el plástico se encuentra ubicado en los patios de acopio de la Planta.

### **FACTORES ENERGETICOS DIRECTOS ASOCIADOS A LA OPERACIÓN DE PLASTICOMBUSTIBLES**

A continuación, presentamos un cuadro que muestra el Balance de Masa durante el proceso a nivel de Planta Piloto de Plasticcombustibles:



## Balance de Materiales en la Producción de Diesel Vehicular a partir de Plásticos de deshecho



Fuente: Dr. Calderón Labs, Sep/2020

**Grafica No. 1 Balance de Masa en la producción de Diesel Vehicular en la Planta Piloto de Plasticombustibles.**

Como podemos observar en el cuadro anterior, el proceso de obtención de Plasticombustibles implica dos etapas: Pirólisis y Destilación

Para el procesamiento de 250 kg de plástico, en la etapa de pirólisis se consumen 60 kg de Parafina (Paraffin Wax) y 25 kg de Gas y se producen 128 kg de Crudo pirolítico de plástico, 15 kg adicionales de Parafina, 10 kg adicionales de Gas, 10 kg de Carbonilla y 2 kg de Agua.

En la etapa de destilación, se procesan los 128 kg de crudo pirolítico de plástico obtenidos en la etapa anterior y se consumen 11 kg de parafina generados en esta etapa y se obtienen 28 kg de Nafta, 2 kg de Agua, 20 kg de Keroseno, 64 kg de Diesel y 3 kg adicionales de Parafina.

Para el cálculo vamos a expresar y discriminar el resultado de la siguiente forma:

1. Huella de Carbono generada en la producción de Crudo Piroilítico (Etapa de Pirólisis) referida a Crudo de salida, considerando que aquí que el Crudo piroilítico carga con la totalidad de la huella de este proceso.
2. Huella de Carbono generada en la Etapa de Destilación del Crudo Piroilítico, referida al Crudo de entrada. Esta carga con la totalidad de la Huella de esta parte del proceso independientemente de cuáles y cuantos sean los derivados obtenidos.
3. Huella total del proceso completo hasta aquí referida al plástico de entrada.
4. Huella total del proceso referida a la suma de Kerosene + Diesel obtenidos.
5. Huella total del proceso referida a la suma de Kerosene + Diesel + Nafta obtenidos
6. Huella adicional producida en la quema en Tea del Gas sobrante del proceso en la Etapa 1.

Para el cálculo de estas huellas, utilizaremos las siguientes composiciones típicas para el Gas y la Parafina, que son los únicos productos que se quemán durante el proceso así:

### Composición del Gas:

Reportada por Feng Gao en sus tesis de Doctorado en la Universidad de Canterbury y corroborada por el autor.

GAS DE PIROLISIS					
Composición aproximada del Gas			Aportes		
		% v/v	PM	C	H
Metano	CH <sub>4</sub>	12,2	16	9,15	3,05
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	11	30	8,8	2,2
Eteno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	21,1	28	18,09	3,01
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	12	44	9,82	2,18
Propeno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	21,2	42	18,17	3,03
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	8,9	58	7,37	1,53
Buteno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	11,5	56	9,86	1,64
Butadieno	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	2	54	1,78	0,22
		99,9		83,0	16,9

*Adaptado de: Thesis de Canterbury (1)*

### Composición de la Parafina:

Para la composición de la Parafina asumiremos, corroborada por nuestras investigaciones la siguiente composición citada por Miranda et al., consistente de Carbono "C" 85.05 % e Hidrógeno "H" 14.72 % para el Wax Mix con relación atómica C/H de 2.076. Las parafinas producidas en el proceso corresponden al material denominado en la industria petroquímica como "Slack Wax".

Table 2  
Elemental composition of the feedstock and the pyrolysis products

Sample	Pyrolysis temperature (°C)	C	H	N	O <sup>a</sup>	S	Cl	H/C atomic ratio
HDPE	500	84.63	15.23	0.14	ND <sup>c</sup>	ND	ND	2.16
LDPE	500	84.93	14.18	0.08	ND	0.81	ND	2.00
PP	500	84.62	15.23	0.14	ND	0.01	ND	2.16
PS	500	91.63	8.31	0.06	ND	ND	ND	1.088
PVC	520	37.83	4.75	0.05	0.20	0.07	57.10	1.506
Wax <sub>HDPE</sub>	500	85.44	14.41	0.15	ND	ND	ND	2.19
Wax <sub>LDPE</sub>	500	85.33	14.63	0.02	ND	0.02	ND	2.057
Wax <sub>PP</sub>	500	84.94	14.88	0.16	ND	0.02	ND	2.102
Wax <sub>Mix</sub>	520	85.05	14.72	0.01	0.202	0.02	ND	2.076
SR <sup>d</sup> <sub>PVC</sub>	520	94.82	4.86	0.32	0.0	ND	ND	0.615
SR <sub>Mix</sub>	520	94.84	3.34	0.12	1.62 <sup>b</sup>	0.02	0.06	0.422

<sup>a</sup> Calculated by difference.

<sup>b</sup> Oxygen + ash.

<sup>c</sup> ND: not detected.

<sup>d</sup> SR: solid residue.

**Tomado de: Miranda, R. & Pakdel, Hooshang & Roy, Christian & Vasile, Cornelia. (2001). Vacuum pyrolysis of commingled plastics containing PVC II. Product Analysis. Polymer Degradation and Stability. 73. 47-67. 10.1016/S0141-3910(01)00066-0.**

## OTROS FACTORES ENERGÉTICOS ASOCIADOS EN LA PRODUCCION DE PLASTICOMBUSTIBLES

La Huella de Carbono de la Energía Eléctrica en Colombia varía con el Mix Hidroeléctrica/Térmica y para Colombia de acuerdo con XM (3), ver: [Detalle noticias \(xm.com.co\)](http://Detalle%20noticias%20(xm.com.co)) para el año 2019 tuvo el siguiente valor:

Emisiones totales en 2019 (tonCO <sub>2</sub> )	Generación total en 2019 (KWh)	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /MWh)	Factor de emisión (grCO <sub>2</sub> /kWh)
11,815,408	71,879,581,392	0.16438	164.38

Teniendo en cuenta que el consumo de energía eléctrica es de solo 0.48 kWh/gln, este representa 78.9 gr de CO<sub>2</sub> eq. por gln de combustible refinado producido. Esto equivale aproximadamente el 1 % del valor generado por la combustión necesaria en el proceso de pirólisis, el cual asciende aproximadamente a 7000 gr/gln como veremos en el siguiente cuadro.

## OTROS FACTORES EXCLUIDOS

Expresamente se han excluido los factores del “Alcance 3”, los cuales corresponden a la huella de carbono generada en las labores de acopio y transporte del plástico hasta la planta de procesamiento y el transporte del personal operativo de la planta.

## RESULTADOS

Materia Prima de plástico; kg/Batch	250		lts	glns	
Producción de Crudo Pirolítico; kg/Batch	128		150,6	39,8	
Densidad del Crudo Pirolítico; g/cm3	0,85				
Consumo de Parafina; kg/Batch	60				
Consumo de Gas en proceso; kg/Batch	25				
Quema de Gas en TEA; kg/Batch	10				
Contenido de C en la Parafina; %	85,05				
Contenido de C en el Gas; %	83				
Cantidad de C quemado de Parafina en proceso; kg/batch	51,03				
Cantidad de C quemado de Gas en Proceso	20,75				
Cantidad de C quemado de Gas en TEA	8,3				
CO2 producido por el C de Parafina quemada en el proceso; kg/Batch	187,11				
CO2 producido por el C del Gas quemado en el proceso; kg/Batch	76,08				
CO2 producido por el C del Gas quemado en la TEA; kg/Batch	30,43				
Total del CO2 producido en el proceso de Pirólisis sin quemar el Gas de TEA; kg/Batch	263,19				
Total del CO2 producido en el proceso de Pirólisis quemando el Gas de TEA; kg/Batch	293,63				
			gr/MJ		
Huella de Carbono referida al Crudo Pirolítico sin incluir la quema del Gas de TEA; kg/kg	2,06		45,69		
Huella de Carbono referida al Crudo Pirolítico incluyendo la quema del Gas de TEA; kg/kg	2,29		50,98		
Huella de Carbono referida al Crudo Pirolítico sin incluir la quema del Gas de TEA; kg/gl	6,62				
Huella de Carbono referida al Crudo Pirolítico incluyendo la quema del Gas de TEA; kg/gl	7,38				
<b>PROCESO DE DESTILACION</b>					
Crudo Pirolítico a Destilación; kg/Batch	128		Densidades	Lts	glns
Producción de Nafta; kg/Batch	28		0,76	36,8	9,73
Producción de Kero; kg/Batch	20		0,8	25,0	6,61
Producción de Diesel; kg/Batch	64		0,89	71,9	19,00
Total de Líquidos Aprovechables producidos en Destilación; kg/Batch	112				35,34
Consumo de Parafina en Destilación; kg/Batch	11				
Cantidad de C quemado de Parafina en Destilación; kg/Batch	9,36				
CO2 producido por el C de Parafina quemada en Destilación; kg/Batch	34,3				
Huella de Carbono generada en Destilación; CO2 eq. kg/gln	0,97				
Poder Calorífico de Líquidos producidos; MJ comb/Batch	5040				
Huella de Carbono en gr/CO2 eq/Mjcomb	6,81				

## DISCUSION DE RESULTADOS

El presente estudio arroja que la pirólisis del plástico en las condiciones de la planta Piloto, produce una Huella de Carbono entre 6.62 y 7.38 kg de CO2 eq. por galón de crudo producido o 45 y 50 gr de CO2 equivalente por Mega Julio de energía recuperada en forma de Crudo Pirolítico. Esta es la parte de la Huella que gravita contra la desaparición de aproximadamente 7 kg de plástico por Galón de crudo pirolítico producido. En otras palabras, en lugar de dejar una huella de 7 kg de plástico, estamos dejando una huella de aprox. 7.0 kg de CO2

Si se pudiesen descontar 7 kg de Pastico por galón de combustible, se verían neutralizados los 6.62 o 7.38 kg de CO2 equivalente/gln emitido durante el proceso de pirólisis.

Sin embargo, al analizar esta huella desde el punto de vista energético, referida a Mega Julios de Energía, y compararla con la Huella (Well to Tank), la cual para la gasolina motor es aproximadamente de 21.5 gr/MJ Comb. y para el Diesel es 16.7 (4) vemos que la Huella es entre 45 y 50 gr/Mj comb. Lo cual, en otras palabras, es entre el doble y el triple frente al promedio de los combustibles derivados del Petróleo, los cuales en un 70 % solo requieren destilación.

Debemos recalcar que, durante la producción del Diesel petroquímico derivado de crudo natural, no se puede descontar la huella de la materia prima ya que el crudo en el yacimiento por definición posee huella "Cero". Por el contrario, en nuestro proyecto, por cada galón de combustible producido estamos desapareciendo 7 kg de "Huella" de plástico.

Durante la destilación del Crudo pirolítico, se produce una huella de 6.81 gr de CO<sub>2</sub> eq./MJ comb. , la cual es aproximadamente el 40 % de la Huella producida en la generación del Diesel petroquímico. (Incluyendo Extracción, Refinación y Transporte (WTT – Well to Tank)

Existen algunos estudios de la Huella de Carbono, principalmente de casos europeos, (5) en los cuales casi invariablemente comparan Pirólisis Vs. Incineración o Pirólisis Vs. Relleno Sanitario. En estos casos siempre es favorable a la Pirólisis.

Otros estudios se enfocan en la emisión de contaminantes como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO y Material particulado de metales, tales como Vanadio, Níquel, Mercurio, Arsénico etc. En este caso también la pirólisis es altamente favorable.

En gases efecto Invernadero GEI, la pirólisis es desfavorable frente a la refinación de Crudo Liviano. Sin embargo, la pirólisis desaparece el Plástico de la faz de la tierra y esto se constituye en "Huella de "Plástico" -Carbono- negativa y debe ser descontada de la huella de Carbono. La refinación convencional, si bien desaparece una cierta cantidad de Crudo, este no puede ser descontado ya que mientras se encuentra en el yacimiento no presenta huella sobre el planeta.

En otras palabras, aunque las emisiones de GEI son comparables, la refinación convencional no está desapareciendo la huella de un contaminante (el Plástico). La Pirólisis por su parte Si.

## REFERENCIAS

1. Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels; A thesis Submitted in fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Chemical and Process Engineering; By Feng Gao; University of Canterbury; 2010
2. Miranda, R. & Pakdel, Hooshang & Roy, Christian & Vasile, Cornelia. (2001). Vacuum pyrolysis of commingled plastics containing PVC II. Product Analysis. Polymer Degradation and Stability. 73. 47-67. 10.1016/S0141-3910(01)00066-0.
3. [Detalle noticias \(xm.com.co\)](http://xm.com.co)
4. [Producing gasoline and diesel emits more CO2 than we thought - Innovation Origins](#)
5. VALIDATION REPORT OF C.P.E Project Number: 6598\_CA\_01 Version - 3.2 Prepared by: Carbon Action Consultants Limited, 16 St Martin's Le Grand, London EC1A 4EN. File # 6598\_CA\_1101; Presented to: Dr K. Garyfalou, Clean Planet Energy, London EC1V 2NX United Kingdom

