



## Validación del Modelo Térmico para un Reactor tipo Horno Rotatorio de Pirólisis de Plástico, a nivel de Planta Piloto PlastiCombustibles.

Por: **Felipe Calderón Sáenz**, Ing. Minas & Mtlg.  
Dr. Calderón Laboratorios Ltda.  
Avda. Cra. 20 No. 87-81; Bogotá D.C., Colombia  
[calderon@drcalderonlabs.com](mailto:calderon@drcalderonlabs.com)  
noviembre 16 de 2019.

### I. Resumen:

La pirólisis es un proceso válido para la conversión de residuos plásticos en combustibles vehiculares u otros hidrocarburos líquidos y gaseosos, es de carácter endotérmico llevado a cabo a altas temperaturas 500-550°C en ausencia de oxígeno. Sus variables fundamentales son: materia prima, temperatura, presión, catalizador, tiempo de operación y tipo de reactor. El presente artículo describe el balance térmico de un reactor batch tipo horno rotatorio de 250 kg/ciclo y su evaluación con el consumo real de diferentes tipos de combustibles empleado en su calentamiento y operación. La información y resultados descritos abarcan más de 100 operaciones a nivel de planta piloto del proyecto PlastiCombustibles, la cual procesa residuos plásticos del tipo: polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS), para su conversión en Diésel Vehicular de bajo contenido de azufre (< 50 ppm S).

Palabras Clave: Pirólisis, Horno Rotatorio, Balance Térmico, Residuos Plásticos.

### II. Introducción:

El plástico es un material de origen sintético derivado del petróleo y de otras sustancias naturales; es versátil, duradero, liviano y de bajo costo; es considerado el material del siglo XXI porque ha contribuido a la innovación en muchas áreas del conocimiento y a mejorar la calidad de vida de los seres humanos; sin embargo, alrededor del 40% del plástico que se produce se usa una sola vez (PlasticsEurope , 2017) entre los más comunes encontramos: envolturas para alimentos u otros productos de consumo, bolsas, tapas, utensilios y cubiertos desechables, envases de bebidas, pitillos - pajitas- y mezcladores, cápsulas de café, toallitas húmedas, elementos de asistencia sanitaria y salud.

Se estima que más de la mitad de todos los plásticos se descartan antes de alcanzar cuatro años de uso. De hecho, más del 72% de los residuos plásticos que se encuentra en los océanos provienen de

aquellos que se usan una sola vez. La disposición inadecuada de los residuos plásticos es uno de los mayores problemas que amenaza el futuro y la sostenibilidad de nuestro planeta, a pesar de que se puede reciclar y es considerado como un valioso recurso energético.

De acuerdo con el estudio "Producción, uso y destino de todos los Plásticos Fabricados", dirigido por el Ecólogo Industrial Roland Geyer de la Universidad de California (Geyer, Jambeck, & Law, 2017), se estima que a 2015 la humanidad había fabricado 8,300 millones de toneladas de plástico desde los años 50 cuando este material empezó a producirse; de este volumen, 6,300 millones de toneladas se han convertido en residuos, de los cuales sólo el 9% se ha reciclado, el 12% se incineró y el 79%, es decir casi 5,000 millones de toneladas de residuos plásticos se han acumulado en vertederos, rellenos sanitarios y en todos los ecosistemas del planeta, incluyendo los océanos.

La producción de plástico se incrementa año tras año, tanto así que solo en los últimos 13 años se ha fabricado más de la mitad de todo el plástico producido desde 1950; por ejemplo, la producción en 2015 superó 322 millones de toneladas, un 3.54% superior al año anterior.

Sin embargo, la cultura de reducir el consumo; reutilizar envases, empaques y demás objetos de plástico; separar en la fuente y reciclar dichos residuos, no se incrementa siquiera en dicha proporción, con lo cual el daño ocasionado por el plástico va en aumento día a día. Se estima que anualmente llegan a mares y océanos, más de nueve millones de toneladas de plásticos y microplásticos que se distribuyen en el fondo marino, en la columna de agua y en la superficie, desequilibrando la vida marina y todo este ecosistema. Estos residuos se han ido acumulando desde hace aproximadamente cuarenta años y por acción de las corrientes marinas se concentran y forman grandes islas localizadas en los océanos Índico, Atlántico y Pacífico (National Geographic, 2019).

Una alternativa de recuperar el potencial energético de estos residuos plásticos es mediante el proceso de pirólisis, que técnicamente se define como una descomposición química de los plásticos a través del calentamiento a temperaturas entre 400 y 600°C, en ausencia de oxígeno (Dr. Calderón Labs, 2016); también conocido como despolimerización catalítica. Este proceso produce aceite de alto contenido energético, un gas sintético conocido como "syngas" y un residuo sólido rico en carbono, conocido como carbonilla.

Esto brinda una solución para la disposición adecuada de una gran cantidad de residuos plásticos posconsumo y posindustria, que no pueden ser recuperados económicamente por operaciones convencionales de reciclado mecánico y que usualmente van a parar a los rellenos sanitarios (Panda, Singh, & Mishra, 2010).

La producción de combustibles vehiculares líquidos, como nafta, kerosene y diésel a partir de residuos plásticos, es una labor que han emprendido desde hace algunos años, varias empresas a nivel mundial tales como: Agylx (Agilix, 2019), Plastic2Oil (Plascti2Oil, 2019), Vadxx (Vadxx, 2019), Res Polyflow (RESPolyflow, 2019) en Estados Unidos, Alphakat (Alphakat, 2019) en Alemania, GreenMantra (GreenMantra, 2019) en Canadá, Technokomplex (Technokomplex, s.f.) en Rusia, Handerek Tech (Technologies, 2019) en Polonia, Ben Balance Energy (Ben, 2019) en Costa Rica y otras muchas en diversos países, con diversos grados de desarrollo tecnológico y profundidad científica.

No obstante, hasta el momento no se ha visto ninguna empresa a nivel mundial que comercialice combustibles vehiculares tales como diésel derivado de pirólisis de plástico y menos aún que comercialice gasolina derivada del plástico. La gran mayoría de empresas mencionadas solo producen combustibles industriales de bajo valor para uso energético, o como materia prima “*feedstock*” para otros procesos petroquímicos, en cuyo caso su valor se asimila a los crudos del sector petrolero.

En aras de obtener combustibles de grado vehicular, los tipos de plástico que se deben aprovechar son: polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS); cuyos monómeros están constituidos por Carbono e Hidrógeno (Pinto, Costa, Gulyurtlu, & Cabrita, 1999). No se debe procesar materiales que contengan los siguientes heteroátomos: Cloro, Nitrógeno, Azufre y Oxígeno (Scheirs & Kaminsky, 2006), por ende, materiales como: policloruro de vinilo (PVC), poliamidas, cauchos vulcanizados o neumáticos, Tereftalato de Polietileno (PET), poliuretanos, policarbonatos etc., no deben ser procesados, debido a que inducen problemas de corrosión en los equipos y deterioran la calidad de los combustibles líquidos obtenidos.

Los principales tipos de reactores que figuran en la literatura tanto científica como comercial son los siguientes: reactor de lecho fijo vertical con o sin agitación, reactor de tornillo, reactor de lecho fluidizado con material de transferencia inerte o activo catalíticamente “*fluid catalytic cracking*”, y reactor de horno rotatorio (Wong, Ngadi, & Abdullah, 2015).

Desde el punto de vista teórico, los aspectos más importantes a tener en cuenta en el diseño de un reactor de pirólisis son: la transferencia de calor y la evacuación de los productos de la reacción. Es necesario tener en cuenta que el coeficiente de transferencia de calor dentro de una masa fundida de plástico es en general muy bajo. Por ello, la superficie de transferencia de calor deberá ser lo más grande posible para compensar los bajos coeficientes de transferencia de calor sin necesidad de recurrir a diferenciales de temperatura demasiado grandes. Igualmente, la renovación de la masa de plástico en contacto con la superficie de transferencia también tiene una influencia marcada en la reacción al evitar sobrecalentamientos locales los cuales conducen a reacciones indeseadas como la formación de coke (Dr. Calderón Labs, 2016).

Los reactores de lecho fijo, suelen ser recipientes simplemente calentados por el fondo y las paredes. Tienen la ventaja de su enorme simplicidad, pero grandes desventajas desde el punto de vista operativo, tales como la mala transferencia de calor y de masa, la poca superficie de transferencia, la adherencia del coque al fondo del recipiente, el sobrecalentamiento del fondo o de las paredes secas, la deformación del cuerpo, especialmente del fondo, la limpieza de los productos de coque adheridos al fondo y las paredes (Obando, 2015). Cuando se utiliza agitación en este tipo de reactores, mejoran algunos factores como la transferencia de calor y de masa, a costa de un gran consumo de potencia, debido a la alta viscosidad de la masa. A menudo se origina la formación de costras que van engrosando con el tiempo llegando a afectar la transferencia de calor y el funcionamiento del agitador, sumado a que no todas las cargas son susceptibles de ser agitadas.

En los sistemas de lecho móvil como los reactores de tornillo, con o sin elementos inertes de transferencia de calor tales como el reactor de esferas recirculantes (Fonseca, 2016), la transferencia se realiza de un medio calefactor a los cuerpos de calentamiento y de estos a la masa

de plástico. Desde el punto de vista de transferencia de calor, estos suelen ser bastante eficientes, pero suelen ser de alta complejidad mecánica y elevado costo.

El reactor de lecho fluidizado es el reactor por excelencia para las reacciones de cracking catalítico en la industria petrolera. Utiliza como elemento de transferencia de calor el mismo catalizador, el cual se calienta y cede el calor a los productos de reacción durante el ciclo de cracking (Fonseca, 2016). Este es un reactor de alta complejidad y elevado costo. Permite la utilización de una gran cantidad de catalizador en relación con la Carga, relación carga: catalizador **1:10 (Kunwar, Cheng, Chandrashekar, & Sharma, 2016). Usualmente 1:6-8**

El reactor de horno rotatorio calentado indirectamente, reúne algunas ventajas en cuanto a transferencia de calor, ya que posee una gran superficie de calentamiento, comparada con un reactor vertical estacionario. Por otro lado, la remoción continua de los materiales en contacto con la superficie de transferencia, mejora enormemente los coeficientes de transferencia de calor (Elías & Velo, 2012). La adhesión del coque a la superficie del reactor presumiblemente es un problema menor que en un reactor estacionario vertical, debido a la flexibilidad natural que posee la carcasa de un horno rotatorio y que hace que la costra que se forma se desprenda con facilidad.

En los diferentes reactores se presentan los siguientes fenómenos: cracking catalítico, cracking térmico, evaporación y reflujo de condensados, este último da origen a reacciones de cracking secundario. En el horno rotatorio a diferencia del horno de marmita vertical estacionaria, no se presenta reflujo de condensados y por consiguiente no hay lugar a reacciones de cracking secundario.

Mientras más rápida sea la evacuación de los gases del horno y su subsecuente enfriamiento, menos oportunidad habrá de que las moléculas se sigan rompiendo hasta alcanzar pesos moleculares menores a C20. Por el contrario, mientras más lenta sea la evacuación de los gases del horno y su subsecuente enfriamiento, mayor oportunidad habrá de que las moléculas se sigan rompiendo hasta alcanzar pesos moleculares menores a C20. (Arabiourrutia, y otros, 2012). Es por esta razón que el Horno rotatorio al contrario del Horno de marmita vertical estacionaria, produce una menor cantidad de crackeo y un producto más rico en parafinas de peso molecular elevado.

Como catalizador se usan sólidos amorfos de sílice-alúmina y zeolitas ZSM-5 (Aguado, Serrano, & Escola, 2008), cuya función es reducir la velocidad de reacciones secundarias hacia productos no deseados como gases y alquitranes y mejorar la selectividad de una reacción cambiando el rendimiento hacia la generación de líquido combustible (Ortíz & Mesa, 2016), cuando se procesan residuos plásticos posconsumo, separados y compactados en la fuente con cierto porcentaje de suciedad 3-5% p/p, se logra una catálisis autógena que hace las veces de catalizador. El uso o no de catalizador se debe analizar basado en su costo, vida útil por desactivación o envenenamiento y recuperación **de este** para el proceso.

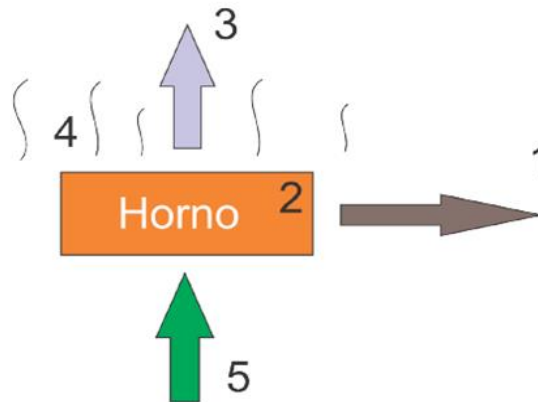
El rendimiento de los productos obtenidos depende del tipo de reactor, materia prima utilizada y demás condiciones de operación, los rendimientos promedio obtenidos a nivel de planta piloto en el proyecto PlastiCombustibles corresponden a: 5% p/p Carbonilla, 60% Crudo, 20% Parafina y 15% de gas. Para una carga de 250 kg/batch se obtienen: 12.5 kg carbonilla, 150 kg Crudo @  $\rho=0.803 \text{ g/cm}^3$  equivalen a 50 gal Crudo, 50 kg parafina y 37.5 kg de gas.

### III. Materiales y Métodos:

El Balance Térmico o de Energía corresponde a la energía en forma de calor que requiere el reactor de Horno Rotatorio para llevar a cabo la reacción de pirólisis o descomposición catalítica durante el tiempo establecido de operación, para ello se considera el cambio entálpico que sufre el plástico en bruto desde la temperatura ambiente de 25°C cuando es cargado al reactor, hasta cuando alcanza los 500°C aproximadamente en el interior del reactor y su posterior entalpia de reacción o cracking y vaporización para generar la fase volátil ya craqueada.

A continuación, se describen las corrientes o flujos de energía que componen el Calor Bruto necesario requerido por el horno:

*Figura 1. Diagrama Balance Térmico Horno de Pirólisis.*



1. Calor que Sale con los productos de la reacción.
2. Calor que consume el calentamiento del equipo.
3. Calor que sale con los gases de combustión.
4. Calor que se pierde por conducción y convección a la atmósfera por el aislamiento del equipo.
5. Entrada de Calor necesario para el proceso.

*Tabla 1. Corrientes del Balance Térmico del Horno de Pirólisis.*

| Nomenclatura Corriente | Descripción Corriente  | Tipo Corriente |
|------------------------|--|----------------|
| Q1                     | Calor de Cracking—Pirólisis                                      | Entrada        |
| Q2                     | Calor Calentamiento Cuerpo del Reactor                           | Entrada        |
| Q3                     | Pérdidas Gases Combustión  | Salida         |
| Q4                     | Pérdidas por Convección y Radiación desde las paredes del Horno. | Salida         |
| Q5                     | Calor Bruto Necesario  | Total Entrada  |

Para calcular el cambio entálpico para cada corriente, se establece un perfil térmico o ruta que sigue el material plástico dentro del horno; además se requieren propiedades físicas del acero del reactor como el calor específico  $C_p$  (KJ/kg °C) y propiedades del cracking de plástico como el calor latente de vaporización  $\Delta H$  (KJ/kg):

Tabla 2. Perfil Térmico.

| Perfil Térmico |                         |     |
|----------------|-------------------------|-----|
| T <sub>1</sub> | T ambiente (°C)         | 25  |
| T <sub>2</sub> | T fusión Plástico (°C)  | 240 |
| T <sub>3</sub> | T rxn cracking (°C)     | 340 |
| T <sub>4</sub> | T gases bellow (°C)     | 400 |
| T <sub>5</sub> | T pared ext. Horno (°C) | 500 |
| T <sub>6</sub> | T gases chimenea (°C)   | 600 |

El perfil térmico presentado en la tabla 2 se validó a nivel de planta piloto con mediciones in situ con termocuplas tipo K ubicadas en la carcasa externa del reactor en su zona de calentamiento, tanto en la línea que sale del horno o prensa estopa "bellow" y en los gases efluentes de la chimenea.

Tabla 3. Propiedades Físicas requeridas en el Balance Térmico.

|                 | Tf (°C) | Tb (°C) | Cp (kJ/kg °C) | ΔH <sub>f</sub> (kJ/kg) | ΔH <sub>vap</sub> (kJ/kg) | ΔH <sub>cracking</sub> (kJ/kg) | Cp <sub>vap</sub> (kJ/kg °C) |
|-----------------|---------|---------|---------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Plástico        | 240     | 300     | 1.67          | 210                     | 350                       | 625                            | 1.5                          |
| Agua            | 0       | 100     | 4.18          | 334                     | 2,257                     |                                | 2.08                         |
| Acero al Carbón | 1,530   |         | 0.45          |                         |                           |                                |                              |

Las propiedades físicas del plástico a tener en cuenta son: Punto de Fusión y Ebullición (°C), Calor Específico del plástico fundido y en fase de vapor (kJ/kg °C), Calor Latente de Fusión y Evaporación (kJ/kg) y la Entalpía de Cracking o reacción (kJ/kg). La entalpía de cracking reportada por algunos autores es de 1047 kJ/kg (Gao, 2010) la cual ha sido reportada para montajes experimentales de laboratorio, este valor ha sido validado en el presente balance y no coincide con los consumos de combustible reportados en la práctica.

La memoria de cálculo para el balance térmico del horno se desarrolla a continuación; la eficiencia del sistema de combustión y el porcentaje de pérdidas por convección hacia el ambiente se calculó en 35%:

Ecuación 1. Balance Global, consumo de energía.

$$Q_5 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

Ecuación 2. Calor de Cracking- Reacción Pirólisis.

$$Q_1 = Q_{plástico} + Q_{agua}$$

$$Q_{plástico} = m_{plástico} [Cp_s(T_f - T_1) + \Delta H_f + Cp_s(T_3 - T_2) + \Delta H_{cracking} + \Delta H_{vap} + Cp_{vap}(T_4 - T_3)]$$

$$Q_{agua} = m_{agua} [Cp_{liq}(T_b - T_1) + \Delta H_{vap} + Cp_{vap}(T_4 - T_b)]$$

**Ecuación 3. Calor de Calentamiento del Cuerpo del Reactor y Horno.**

$$Q_2 = Q_{\text{horno}} + Q_{\text{refractario}}$$

$$Q_{\text{horno}} = F_{S1} * m_{\text{horno}} [Cp_{\text{acero}} (T_5 - T_1)] \quad F_{S1} = \text{Factor de Seguridad horno} = 2$$

$$Q_{\text{refractario}} = F_{S2} * Q_{\text{horno}} \quad F_{S2} = \text{Factor de Seguridad refractario} = 1.5$$

El presente balance esta realizado para una carga de plástico de 250 kg/batch, el cuerpo del horno está fabricado en acero de caldera ASTM 516-GR 70 y pesa 350 kg; por su parte la humedad del material se asumió en un 5%. El ciclo de operación es de 6 horas.

Si el proceso fuera ideal con cero pérdidas al ambiente, el calor bruto necesario sería la suma de Q1 y Q2; no obstante, existen pérdidas asociadas a los gases de combustión que salen del horno debido a su calentamiento indirecto; dichas pérdidas se calculan con base a la eficiencia del sistema de calentamiento.

**Ecuación 4. Definición Eficiencia Sistema Calentamiento.**

$$E_{\text{Sist-Calentamiento}} = \frac{(T_6 - T_4)}{(T_6 - T_1)} = \frac{(600 - 400)}{(600 - 25)} = 35\%$$

**Ecuación 5. Calor Perdido por los gases de combustión efluentes del horno.**

$$E_{\text{Sist-Calentamiento}} = \frac{(\text{Calor Ideal})}{(\text{Calor Calentamiento Real})} = \frac{(Q_1 + Q_2)}{(Q_1 + Q_2 + Q_3)}$$

$$Q_3 = (Q_1 + Q_2) \left[ \frac{1}{E_{\text{Sist-Cale}}} - 1 \right]$$

Finalmente existen pérdidas de calor por las paredes del equipo o de recubrimiento del horno, esto corresponde a pérdidas por convección que se generan debido al gradiente de temperatura entre la cámara de combustión y la temperatura ambiente. Dichas pérdidas se estimaron en un 35% del calor bruto necesario para el calentamiento del horno.

**Ecuación 6. Definición de pérdidas de Calor por las paredes del Horno.**

$$P = \frac{Q_4}{Q_5} = \frac{(\text{Pérdidas Calor por paredes})}{(\text{Calor Bruto Necesario})} \quad P = \% \text{ pérdidas por las paredes del horno} = 35\%$$

**Ecuación 7. Calor Perdido por convección y radiación desde las paredes del Horno.**

$$P = \frac{Q_4}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}$$

$$Q_4 = (Q_1 + Q_2 + Q_3) \left[ \frac{P}{1 - P} \right]$$

#### IV. Resultados y Discusión:

Basado en el desarrollo del balance térmico, la demanda Total de Calor es en promedio 3,823 MJ/batch para una carga de 250 kg de plástico en bruto, el cual es consumido para el calentamiento del cuerpo del Horno de 350 kg en acero de caldera y el cracking de la carga de plástico, sumado a las ineficiencias y pérdidas por las paredes del sistema de calentamiento.

En los quemadores actuales se queman 25 kg de Gas No Condensable de un total de 37.5 kg, lo cual representa 66.67 % de todo el gas producido. En términos energéticos representa el 18.07% del calor bruto necesario en el horno, el Gas aporta 691 MJ. El poder calorífico del gas es de 46.1 MJ/kg y se asume un porcentaje de aprovechamiento del 60% de todo el calor aportado por el gas.

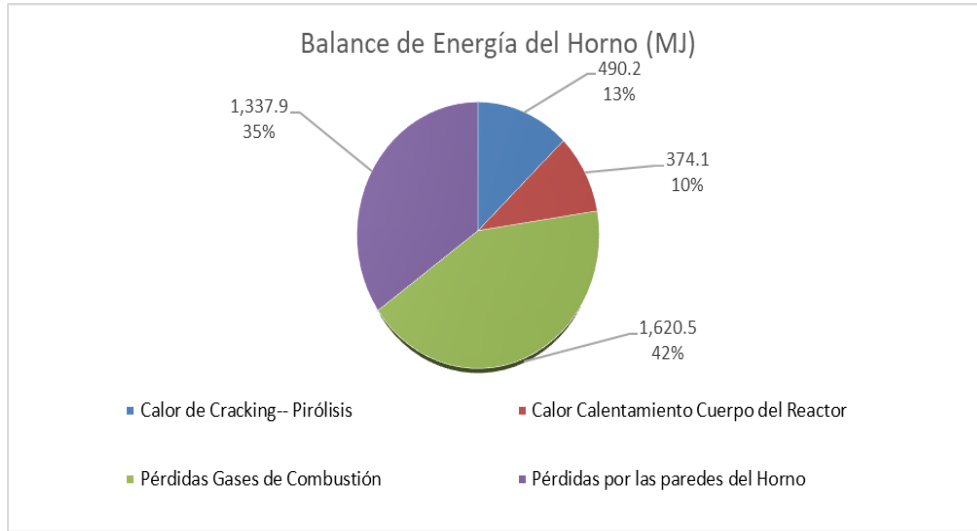
El calor faltante se suple con combustible adicional, antes se usaba Carbón Mineral, y su consumo por batch oscila de 90-120 kg Carbón que aporta el 80% restante del calor requerido, el carbón aporta 3,132 MJ.

*Tabla 4. Resultados del Balance Térmico por Corriente.*

| <b>Balance de Energía del Horno</b>       | <b>(MJ)</b>           | <b>(MJ/ kg plástico)</b> | <b>(kcal)</b>         | <b>(kcal/ kg plástico)</b> |
|---|-----------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Calor de Cracking-- Pirólisis             | 490.2                 | 1.96                     | 117,159               | 468.64                     |
| Calor Calentamiento Cuerpo del Reactor    | 374.1                 | 1.50                     | 89,403                | 357.61                     |
| <u>Calor de Proceso</u>                   | 864.3                 | 3.46                     | 206,562               | 826.25                     |
| <b>Pérdidas Gases de Combustión</b>       | 1,620.5               | 6.48                     | 387,305               | 1,549.22                   |
| <u>Sub- Total Calor Bruto</u>             | <b>2,484.7</b>        | 9.94                     | 593,867               | 2,375.47                   |
| <b>Pérdidas por las paredes del Horno</b> | 1,337.9               | 5.35                     | 319,775               | 1,279.10                   |
| <b><u>CALOR BRUTO NECESARIO</u></b>       | <b><u>3,822.7</u></b> | 15.29                    | <b><u>913,642</u></b> | <b><u>3,654.57</u></b>     |
| CALOR APORTADO GAS                        | 690.75                | 2.76                     | 165,093               | 660.37                     |
| <b><u>CALOR FALTANTE</u></b>              | <b><u>3,131.9</u></b> | 12.53                    | <b><u>748,549</u></b> | <b><u>2,994.19</u></b>     |



**Figura 2. Balance de Energía del Horno- Términos Porcentuales.**



**Tabla 5. Índice de Consumo Energético Horno de Pirólisis.**

|  |        |
|--|--------|
| <b>Índice Consumo Energía (kcal/kg plástico)</b> | 2994.2 |
| <b>Índice Consumo Energía (MJ/kg plástico)</b>   | 12.53  |

El Horno rotario de 250 kg/batch presenta grandes ineficiencias por pérdidas de calor asociadas a las pérdidas por las paredes del equipo (35%) y por la energía de los gases de calentamiento o combustión que salen del sistema sin ningún proceso de integración térmica (42%), es decir se emiten libremente a la atmósfera sin utilizarlos en el precalentamiento del siguientes batch o ciclo.

El calor faltante de 3,132 MJ se supe con combustible adicional; con fines comparativos se presenta el equivalente de diferentes combustibles que pueden ser usados para calentar el horno, el poder calorífico se tomó de la literatura (INCOMBUSTIÓN, 2016).

**Tabla 6. Propiedades Combustibles Sólidos, Líquidos y Gas.**

| Combustible                                     | PC (MJ/kg) | PC (kcal/kg) | PC (BTU/kg) |
|---|------------|--------------|-------------|
| Carbón Mineral                                  | 30.4       | 7,265        | 28,814      |
| Madera Seca                                     | 19         | 4,541        | 18,008      |
| Residuos Plásticos                              | 46         | 10,994       | 43,599      |
| Nafta ( $\rho$ 740 kg/m <sup>3</sup> )          | 46.0       | 10,994       | 43,599      |
| Diésel ( $\rho$ 860 kg/m <sup>3</sup> )         | 42.0       | 10,038       | 39,808      |
| Crudo Castilla ( $\rho$ 941 kg/m <sup>3</sup> ) | 43.1       | 10,291       | 40,813      |
| Gas Natural                                     | 50.2       | 12,001       | 47,594      |
| Gas Natural (MJ/m <sup>3</sup> estándar)        | 35.7       |              |             |
| GLP   | 49.9       |              |             |
| GLP (MJ/m <sup>3</sup> estándar)                | 99.2       |              |             |

|               |       |        |        |
|---------------|-------|--------|--------|
| Gas Pirólisis | 46.05 | 11,006 | 43,647 |
|---------------|-------|--------|--------|

En la práctica a nivel de planta piloto se han realizado 140 operaciones desde el año 2014 hasta la fecha procesando 34 ton de residuos plásticos produciendo 6,800 gal de Crudo y 4,280 gal de Diésel; el consumo promedio de energía registrado es de 11.85 MJ/kg o 2,831 kcal/kg, la planta piloto demanda 4kWh de energía eléctrica para la operación de bombas y demás equipos eléctricos. El índice de producción es de 5 kg plástico/ gal crudo y 8 kg plástico/ gal diésel.

Por batch se producen 32 gal de Diésel PlastiCombustibles el cual es el producto de interés del proceso, este producto tiene un poder calorífico de 42 MJ/kg diésel equivalente a 132 MJ/gal diésel; es decir que en total se estarían produciendo 4,224 MJ/batch.

*Ecuación 8. Relación eficiencia energética, planta piloto PlastiCombustibles de 250 kg/batch.*

$$\frac{\text{Energía Producida}}{\text{Energía Consumida}} = \frac{4,224}{2,831} = 1.49$$

Esto indica que estamos produciendo un 43% de energía adicional a la consumida en forma de calor.

*Tabla 7. Cantidades de Combustible Adicional requerido en el Horno de Pirólisis.*

| Calor Faltante       | (MJ)                | (kcal)                          |
|----------------------|---------------------|---------------------------------|
|                      | 3,132               | 748,549                         |
| Combustible Sólido   | Cantidad (kg/batch) |                                 |
| Carbón Cundinamarca  | 103.02              |                                 |
| Madera               | 164.84              |                                 |
| Residuos Plásticos   | 68.09               |                                 |
| Combustible Líquidos | Cantidad            |                                 |
|                      | (kg/batch)          | (gal/batch)                     |
| Nafta                | 68.09               | 24.31                           |
| Diésel               | 74.57               | 22.91                           |
| Crudo Castilla       | 72.73               | 20.41                           |
| Combustible Gas      | Cantidad            |                                 |
|                      | (kg/batch)          | (m <sup>3</sup> estándar/batch) |
| Gas Natural          | 62.37               | 87.85                           |
| GLP                  | 62.76               | 31.57                           |

## V. Conclusiones:

La eficiencia energética en un proceso de pirólisis es fundamental para garantizar el escalamiento industrial de este tipo de tecnologías a plantas con capacidades de 10, 20 o inclusive 50 ton/batch. El Horno rotario de la Planta Piloto PlastiCombustibles tiene una eficiencia térmica muy baja aproximadamente del 23 %, debido a que el 77% de la energía en forma de calor suministrada al sistema se pierde hacia la atmósfera.

Para poder aumentar la eficiencia térmica del horno rotario se debe realizar un proceso de integración térmica entre la corriente efluente de gases de combustión de calentamiento y la corriente de aire frío que se usa para alimentar el aire primario de los quemadores del horno, esto implica un precalentamiento del aire que ingresa al sistema, elevando  $T_1$  de 25 °C a 200 °C, reduciendo así el diferencial de temperatura y por ende el consumo de energía.

Las pérdidas asociadas a convección y radiación desde las paredes del equipo se pueden disminuir incluyendo un mayor recubrimiento de materiales aislantes como lana de roca, lana de cerámica, doble muro de ladrillo refractario etc. Esto con el fin de lograr un sistema con muy buen aislamiento y pocas pérdidas de calor hacia el ambiente.

En términos generales se describió un balance térmico detallado que puede ser extrapolado al diseño de hornos de mayor tamaño, cuyos resultados han sido validados a nivel de planta piloto en el proyecto PlastiCombustibles con respecto al consumo real de diferentes tipos de combustibles.

## VI. Referencias:

Agilix. (2019). Obtenido de <https://www.agilyx.com/>

Aguado, J., Serrano, D., & Escola, J. (2008). Fuels from Waste Plastics by Thermal and Catalytic Processes: A Review. *American Chemical Society*.

Alphakat. (2019). Obtenido de <https://www.alphakat.de/>

Arabiourrutia, M., Elordi, G., Lopez, G., Borsella, E., Bilbao, J., & Olazar, M. (2012). Characterization of the waxes obtained by the pyrolysis of polyolefin plastics in a conical spouted bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*.

Ben, B. E. (2019). Obtenido de <http://b-energy.cc/>

Dr. Calderón Labs. (2016). La Producción de Combustibles Vehiculares a partir de Plásticos de Deshecho. En F. C. Sáenz.

Elías, X., & Velo, E. (2012). *La Pirólisis*. Díaz de Santos.

Fonseca, W. (2016). Evaluación de un reactor de Lecho Fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. *Universidad de los Andes*.

Gao, F. (2010). Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels. *University of Canterbury*.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *SCIENCE ADVANCES*, 1-5.

GreenMantra. (2019). Obtenido de <http://greenmantra.com/>

- INCOMBUSTIÓN. (2016). Consultoría Técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles colombianos- FECOC. *Investigación e Innovación en Combustión Avanzada de uso Industrial*.
- Kunwar, B., Cheng, H., Chandrashekar, S., & Sharma, B. (2016). Plastic to fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- National Geographic. (2019). Great Pacific Garbage Patch.
- Obando, G. (2015). Condiciones de Diseño de un Reactor de Pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos. *Universidad de Manizales, Colombia*.
- Ortiz, C., & Mesa, P. (2016). Evaluación del proceso de pirólisis para la producción de diesel a nivel laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos. *Fundación Universidad de América*.
- Panda, A., Singh, R., & Mishra, D. (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel, A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added-A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Pinto, F., Costa, P., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (1999). Pyrolysis of plastic wastes. Effect of plastic. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*.
- Plascti2Oil. (2019). Obtenido de <http://www.plastic2oil.com/site/home>
- PlasticsEurope . (2017). Plastics the facts.
- RESPolyflow. (2019). Obtenido de <http://www.respolyflow.com/>
- Scheirs, J., & Kaminsky, W. (2006). Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels. Wiley series in polymer science.
- Technokomplex. (s.f.). Obtenido de <http://www.tkcomplex.ru/en>
- Technologies, H. (2019). Obtenido de <http://handerek-technologies.com/en/>
- Vadxx. (2019). Obtenido de <https://vadxx.com/>
- Wong, S., Ngadi, N., & Abdullah, I. I. (2015). Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.