

Diseño y construcción de sistema de combustión para reactor pirolítico de polietileno de alta densidad

Design and construction of a combustion system for a high-density polyethylene pyrolytic reactor

Johan Alexis Torres Gamez, Claudio Alberto Moreno Arias

^a Ingeniería Mecánica- Semillero de investigación Energías Alternativas, Fundación Universidad de América, Johan.torres@estudiantes.uamerica.edu.co.
claudio.moreno@profesores.uamerica.edu.co ; <https://orcid.org/0000-0001-6103-8238>

DOI: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno>

Resumen—: La investigación busca diseñar y construir un quemador de gas licuado del petróleo (GLP) para la pirólisis de residuos de polietileno de alta densidad. Utilizando una metodología cuantitativa y experimental, se revisaron conceptos teóricos y se desarrolló el equipo de combustión. Se evalúa su rendimiento en términos de eficiencia y emisiones durante su operación en un reactor pirolítico. El proyecto pretende reducir emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero, ofreciendo una alternativa limpia para la producción de combustibles sintéticos a partir de la descomposición térmica de polímeros. Esta investigación surge como respuesta a la pregunta ¿En qué medida se reducen las emisiones de GEI con la implementación de GLP como combustible en el reactor pirolítico a escala de laboratorio? La presentación del GLP como opción alterna de combustible utilizado en el proceso de pirólisis contribuye a la propuesta de energías alternas en la búsqueda del aprovechamiento de los recursos disponibles para reducir el impacto medio ambiental al momento de hacer uso de tecnologías dispuestas para ello.

Palabras clave— Emisiones, Pirólisis de plástico, Combustibles alternativos, Quemador de GLP, Sostenibilidad ambiental.

Abstract— The research aims to design and construct a liquefied petroleum gas (LPG) burner for the pyrolysis of high-density polyethylene waste. Using a quantitative and experimental methodology, theoretical concepts were reviewed, and the combustion equipment was developed. Its performance in terms of efficiency and emissions will be evaluated during its operation in a pyrolytic reactor. The project aims to reduce pollutant and greenhouse gas emissions, offering a clean alternative to produce synthetic fuels from the thermal decomposition of polymers. This research addresses the question: To what extent are greenhouse gas (GHG) emissions reduced with the implementation of LPG as fuel in a laboratory-scale pyrolytic reactor? The introduction of LPG as an alternative fuel option in the pyrolysis process contributes to the proposal of alternative energies in the search for utilizing available resources to reduce environmental impact while employing appropriate technologies.

Keywords— Emissions, Plastic Pyrolysis, Alternative fuels, LPG Burner, Environmental sustainability.

I. INTRODUCCION

El uso masivo de combustibles fósiles en la sociedad actual, su carácter limitado, con las consecuentes fluctuaciones en el mercado y repercusiones en los factores geopolíticos debido a la dependencia energética, hacen necesaria la búsqueda de fuentes de energía alternativas que se formen como un aliado de los combustibles o se genere un redireccionamiento al aprovechamiento de los recursos obtenidos en el proceso de extracción del petróleo, de la mano con un maduro desarrollo tecnológico, sin dejar a un lado el incremento de los gases efecto invernadero y consecuente calentamiento global, todo como una de las consecuencias de la explotación masiva de los recursos [1]. Motivados por la necesidad de mitigar los efectos ambientales, investigadores están explorando diversas técnicas de tratamiento de residuos. El objetivo principal es aprovechar el potencial energético de estos materiales. La recuperación de residuos para la generación de biocombustibles de acuerdo con su aplicación tiene diferentes condiciones, una de ellas es la correcta elección de proceso o procedimiento que se quiere realizar para la obtención de estos biocombustibles bien sean sólidos, gaseosos o líquidos, siendo esta última donde se encuentran procesos para la producción de biodiesel tales cuales son: la fermentación, Transesterificación, Pirólisis y procesos combinados [4].

La pirólisis, un proceso conocido desde hace décadas consiste en calentar materia orgánica a temperaturas entre 400°C y 1000°C sin oxígeno. Esto provoca la descomposición del material original en tres fracciones: una gaseosa, una líquida y una sólida, todas ellas con potencial para ser aprovechadas. El proceso consiste en calentar materia orgánica a una temperatura específica y a una velocidad controlada, en un ambiente sin aire ni oxígeno. Esta técnica, conocida como pirólisis, se mantiene durante un tiempo determinado, lo que genera una serie de reacciones químicas y transferencias de calor y masa. Como resultado de la pirólisis, los materiales originales se transforman en una fracción líquida. [8]. Los resultados de la pirólisis consisten en gases que pueden condensarse y en residuos sólidos como carbón o ceniza. Además, los gases condensables pueden descomponerse más en gases no condensables como CO, CO₂, H₂ y CH₄, así como en líquidos y más carbón. [20]. Este proceso hace que se produzca una cantidad de hidrocarburos líquidos y gaseosos que se utilizan como combustibles y fuente de energía [9]. Los sistemas de calentamiento en la pirólisis son una parte importante del proceso, opciones como, resistencias térmicas, combustibles líquidos, combustibles gaseosos y combustibles sólidos, son las alternativas usadas en la transformación de los residuos sólidos en lo que respecta enfáticamente a la fabricación del producto líquido obtenido a partir del proceso [10].

El uso de quemadores en cocinas industriales es esencial, y es importante seguir las normas y buscar mejoras en el proceso. Se realizan ensayos de eficiencia con Gas Natural y GLP para evaluar su potencial de reducción de emisiones. Estos ensayos no están destinados a favorecer los resultados de los quemadores, sino a recolectar información para la fabricación de un quemador en condiciones de trabajo especial. [14]. Los quemadores son dispositivos que introducen aire y combustibles para producir llama y calor. Son responsables de proporcionar una fuente continua de ignición y controlar la mezcla de aire y combustible en la cámara de combustión, determinando así el tamaño, forma y envoltura de la llama. [15]. Según sea el combustible utilizado, los quemadores pueden clasificarse en, quemadores de gas, combustibles líquidos y combustibles sólidos [16].

La producción de contaminantes tiene su foco principal en los procesos de combustión y va de la mano con el combustible utilizado o seleccionado para realizar dicho proceso en el dispositivo o quemador indicado, siguiendo un orden descendente a ascendente, el combustible menos contaminante es el hidrógeno ya que su único producto de combustión es el agua, con la posibilidad de formarse óxidos de nitrógeno; el gas natural produce, dióxido de carbono y da lugar a monóxido de carbono e inquemados. Los aceites y el carbón por su contenido de azufre producen dióxido y trióxido de azufre [17].

En España se hicieron varios experimentos con pirólisis en donde los datos arrojaron que las temperaturas más elevadas ayudan a formar compuestos térmicamente más estables. Un estudio investigativo aseguró que altos niveles de oxígeno a altas temperaturas son hasta un 100% viables para eliminar hidrocarburos aromáticos, alifáticos y parcialmente oxigenados [9]. El GLP, debido al tamaño de sus moléculas y a su capacidad de gasificación rápida y efectiva, permite una combustión extremadamente limpia con emisiones locales de contaminantes como el NO_x, CO y partículas prácticamente inexistentes o muy reducidas. [18].

El gas licuado de petróleo (GLP) es un combustible versátil y limpio utilizado en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales. Ofrece una opción segura y confiable, con una combustión más eficiente y menores emisiones de gases contaminantes en comparación con combustibles tradicionales como el diésel, contribuyendo a un ambiente más limpio. [19]. Para reducir las emisiones contaminantes en el proceso de combustión, es crucial minimizar las pérdidas de combustible no quemado en los gases de escape. Esto se logra aumentando la cantidad de aire disponible, aunque este enfoque también incrementa las pérdidas de entalpía. Por lo tanto, encontrar un equilibrio adecuado entre las pérdidas de entalpía y las pérdidas de combustible no quemado es esencial. [19].

II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

La metodología para este proyecto comprende la revisión, el diseño y la construcción del quemador de GLP, para análisis, mediciones y pruebas en condiciones de trabajo normales en un reactor pirolítico de polietileno de alta densidad.

A. Revisión de antecedentes.

Revisión de los antecedentes investigativos en las bases de datos donde se determinarán los tipos de diseño de quemadores en reactores pirolíticos y así trabajar en un diseño acertado, eficiente y funcional.

-Pirólisis.

En primer lugar, la identificación de los métodos de generación de combustible siendo la pirólisis el método seleccionado para la evaluación y adaptación del quemador es el principal actor de selección dando parámetros de temperaturas en los rangos de 300°C y 1000°C comprendidas dentro del proceso. De acuerdo con la temperatura y la velocidad se obtienen 3 grupos en los que se divide la pirólisis:

Tabla 1. Comparación de tipos de pirólisis [21].

Proceso	Temperatura °C	Velocidad de calentamiento °C/s	Tiempo de residencia	Producto mayoritario
Convencional	500	2	Gases 5 s Sólido horas	Char y condensables
Rápida	400 a 800	>2	Gases: < 2 s	A temperaturas moderadas 500°C, condensables Gases e hidrocarburos
Instantánea	>600	>200	Gases: < 0,5 s	ligeros

El proceso de pirólisis convencional tiene una oscilación de temperaturas entre los 300°C y 500°C con largos periodos en los cuales esta se mantiene estable y constante convirtiéndose así en un proceso relativamente lento. Como se observa en la *Tabla.1* este tipo de proceso obtiene como producto mayoritario los bioaceites, carbón o biochar. Por otro lado, se encuentra la pirólisis flash que se realiza a una velocidad alta y está enfocado a la producción de combustible líquido, como todo proceso de pirólisis es necesario contar con una atmósfera sin oxígeno, este maneja temperaturas que se encuentran entre los 400°C y 550°C.

-Criterios de selección del quemador.

De acuerdo con la información anterior, los criterios genéricos abarcan la temperatura a alcanzar, implicando

tasas de oxigenación y precalentamiento, combustible y selección del carácter oxidante, tiempo de utilización del quemador y flexibilidad de regulación de tasas de aire extremas [16].

Los tipos de quemadores de acuerdo con las diferentes necesidades se clasifican en:

- Quemadores industriales a gas.
- Quemadores para combustible líquido.
- Quemadores para combustibles sólidos.

Siguiendo uno de los criterios de selección generales, en este caso específico se realizó la previa selección del combustible con el cual trabajara el quemador.

-Combustible.

El GLP como combustible hace parte de una energía limpia debido a sus características y bajas emisiones de efecto invernadero, por el tamaño de sus moléculas, fácil y efectiva gasificación, sumado a esto su viabilidad económica, versatilidad y accesibilidad, generación de un proceso de combustión limpio con bajos niveles de emisiones contaminantes lo hacen el combustible adecuado para el proceso de pirólisis.

Tabla 2. Composición y poder calorífico del GLP con sus componentes [18].

		Gaseoso		Líquido			
		Kcal/Nm3	Kcal/Nm3	Kcal/kg	KJ/Kg	Kcal/kg	KJ/Kg
Promedio Mezcla	Hidrocarburos	PCS	PCI	PCS		PCI	
67%	PROPANO	34350	22380	16060	67240	11080	46389,7
33%	BUTANO	31820	29335	11845	49592,6	10920	45719,9
100%	GLP	33515,1	24675,15	14669,05	61416,4	11027,2	46168,7

Entre las características más destacables de este combustible, se encuentra la capacidad calorífica expresada en la Tabla 2. donde se aprecian los valores de cada componente de la mezcla en sus dos estados principales comerciales. La densidad del butano y el propano varía según su estado físico. En estado gaseoso, la densidad relativa del butano es 2.03, mientras que la del propano es 1.57, con el aire como referencia (densidad relativa de 1). Esto no implica que el butano y el propano en estado gaseoso sean el doble de pesados que el aire. Significa que, en comparación con el aire, el butano y el propano ocupan un volumen menor para la misma masa [22]. La versatilidad y eficiencia de este combustible, sumado a sus características fisicoquímicas lo hacen comparable incluso mejor a otros combustibles líquidos o gaseosos de acuerdo con su aplicación. tabla 3.

Tabla 3. Equivalencias energéticas GLP vs otros combustibles [23].

GLP (Kg)	EQUIVALENCIAS					
	Electricidad (Kwh)	Carbon (Kg)	Leña (Kg)	Diesel (glns)	Gasolina (glns)	Petroleo (glns)
1	14	2	6	0,35	0,45	0,37

- Combustión.

Para alcanzar la temperatura requerida en los métodos de generación de combustible por pirólisis, el quemador debe lograr una combustión eficiente, maximizando el calor y alcanzando la temperatura adecuada de la llama. El

exceso de aire puede reducir los residuos de combustión incompleta, pero también aumenta las pérdidas de calor, por lo que es crucial equilibrar la cantidad de aire y combustible para alcanzar la temperatura adiabática óptima de la llama. [16].

- **Combustión completa:** Se da cuando todos los componentes combustibles se queman completamente durante el proceso de combustión.
- **Combustión incompleta:** Cuando los productos de combustión tienen componentes inquietos.
- **Aire teórico:** Es la cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa del combustible.
- **Exceso de aire porcentual:** Cantidad de aire en exceso de la cantidad mínima. 100% aire teórico = 0% aire en exceso [19].
- **Llama:** En este parámetro, el proceso puede ser estacionario o dinámico, dependiendo de la velocidad de reacción de los gases al iniciar la combustión.
- **Llamas de premezcla:** Cuando el combustible se aporta mezclado con el aire a mayor o menor cantidad antes de llegar a la zona de llama, el cual es designado como aire primario.
- **Llama de difusión:** Esta ocurre cuando la mezcla entre el combustible y el comburente es lenta comparada con la velocidad de reacción y a su vez la velocidad de la llama está determinada por la velocidad de la mezcla.
- **Quemadores industriales a Gas:** Estos se clasifican por medio de la alimentación del gas y del aire, entre estos se encuentran los quemadores de premezcla.
- **Quemadores de premezcla a presión:** Este tipo de quemadores tiene aplicaciones en calderas, hornos, secadores, así como su combustible principal puede ser el gas natural, gas propano o gas butano. La mezcla se realiza al interior del quemador creando una mezcla homogénea.

Según lo descrito en la *Tabla 4.* y la aplicación en la cual será usado el quemador, las características adecuadas y que se adaptan a su función lleva a la decisión de enfocar el tipo de quemador al indicado como II-mezcla en boca quemador y de premezcla a presión.

Tabla 4. Clasificación de los quemadores de gas según de mezcla [16].

Sistema / Definición	Forma de mezclado	Método de control	Tipo de quemador	Aplicación típica
I Alimentación aire gas separadas.	No hay mezclado, ambos llegan a presión.	Manual: Dos válvulas Automático: Presiones equilibradas Acoplamiento mecánico.	-	Hornos de vidrio. Hornos de caliza. Grandes instalaciones
II-Mezcla en boca.	En el punto de combustión ambos llegan a presión.	Como en I	De mezcla en boca con bloque de refractario.	Calefactores de aire. Hornos de tratamiento. Hornos de forja. Calderas.

A continuación, se presentan los tipos de regulación de aire primario (Figura 1), los cuales permiten optimizar la potencia de la llama, asegurar un proceso de combustión adecuado y aprovechar eficientemente el calor generado. Se ha seleccionado como opción la regulación mediante posición de arandela.

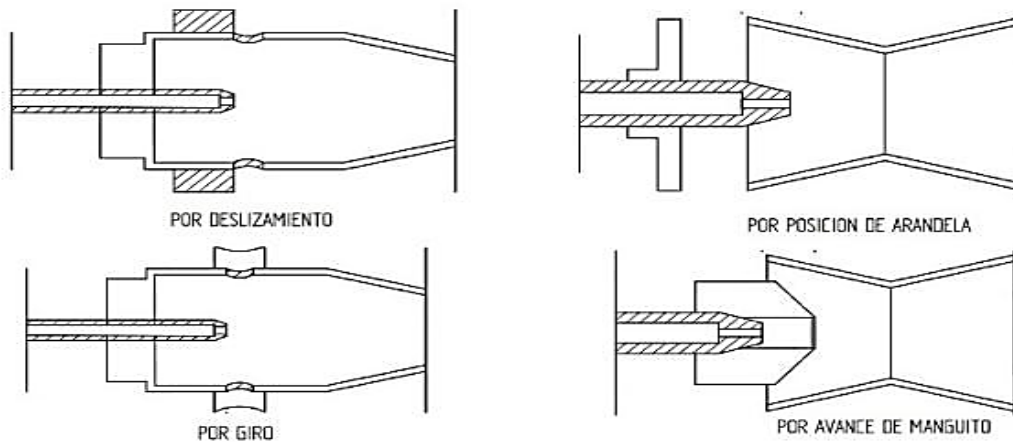


Figura 1. Tipos de regulación de aire primario [16].

- Material.

Siguiendo las temperaturas nombradas anteriormente, la opción más viable para la fabricación es el acero inoxidable austenítico de tipo 304, cuyas características contienen:
Alta ductilidad y maleabilidad, excelente resistencia a la corrosión, buena soldabilidad, resistencia a la temperatura y baja expansión térmica.

B. Fase mediciones y CAD.

En esta etapa se realiza el desarrollo y análisis de la ingeniería aplicada al diseño del quemador de GLP aplicado al reactor pirolítico de polietileno de alta densidad, selección de los materiales, funcionamiento del conjunto, toma de medidas y CAD necesarios.

- Diseño CAD prototipo.

Para la construcción del quemador de GLP se tuvo en cuenta los criterios de selección del quemador, Donde se considera, la temperatura, combustible y condiciones de trabajo a las cuales estará enfrentado. El material del quemador debe tener alta resistencia térmica y mecánica para soportar altas temperaturas sin deformarse, además de ser resistente a la corrosión por el contacto con gas GLP y productos de combustión. También debe poseer buena conductividad térmica para asegurar una transferencia eficiente del calor y mejorar el rendimiento de la combustión.

En base a estos criterios, algunos de los materiales más utilizados para la construcción de quemadores de GLP incluyen: Acero inoxidable, hierro fundido, latón

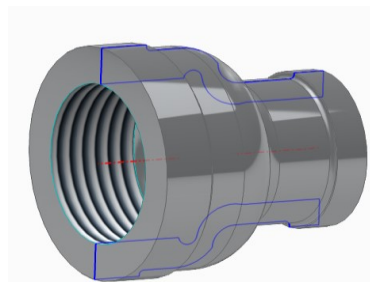


Figura 2. Boca de salida de la llama. Fuente: Los autores

Se seleccionó una copa con medidas de entrada $\frac{3}{4}$ " y salida $1\frac{1}{4}$ " Figura 2. de un material de acero inoxidable 304 de gracias a su resistencia a la corrosión, resistencia térmica, durabilidad, facilidad de limpieza, propiedades de flujo.

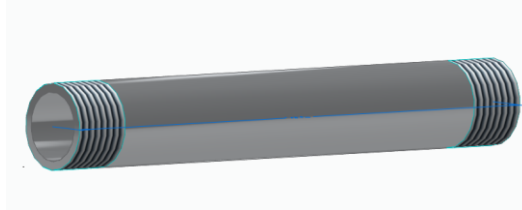


Figura 3. Mezclador de inducción atmosférico. Fuente: Los autores

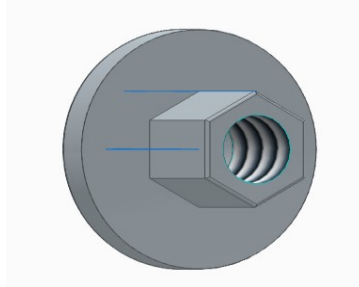


Figura 4. Regulador de aire. Fuente: Los autores

Según la Figura 1. Para el diseño del quemador de premezcla a presión un regulador de aire primario por arandela ofrece diversas ventajas que lo convierten en una opción atractiva para el tipo de trabajo que realiza el quemador.

El sistema de regulación de aire por arandela fue diseñado con una tuerca para un tornillo con rosca M14 unida a una arandela de diámetro 43.8mm por medio de una junta en T soldada con un material West Arco Cromarco 308-16 que ofrece un arco estable en lo que respecta a aceros inoxidables austeníticos y cumple estándares de calidad que debido a su bajo contenido de carbono tiene una buena resistencia a la corrosión. El diámetro de la arandela permite un ajuste adecuado para la correcta regulación de aire Figura 4.

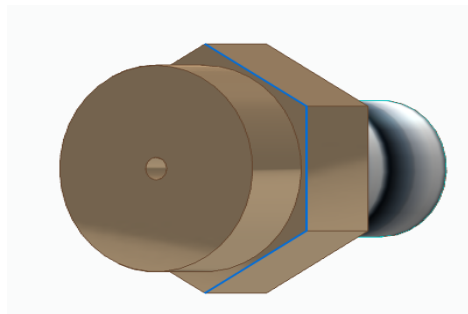


Figura 5. Fisto de inyección GLP. Fuente: Los autores

La selección de un fisto de bronce como inyector Figura 5., comprende características como resistencia a la corrosión al estar expuesto constantemente a un gas, se realizaron cambios en el diámetro de salida modificando el diámetro inicial de 0.5mm a 1mm garantizando un caudal adecuado para la mezcla aire-gas.



Figura 6. Vista izquierda inyector GLP. Fuente: Los autores

Este fue fabricado realizando modificaciones a un tornillo con rosca M14 de longitud 3" y $\frac{3}{4}$ " con cabeza hexagonal. Inicialmente se reduce el diámetro de la cabeza del tornillo Figura 6. en un torno convencional hasta llegar a tener unas dimensiones de 13 mm de diámetro puesto que es necesario mantener un valor que permita seguir realizando modificaciones. En el otro costado del tornillo. Se realizó un agujero pasante con una broca de 5mm de diámetro y posteriormente un roscado con unos machos M6x1, en ese costado estará ubicado el fisto de inyección de GLP. En el diámetro modificado de la cabeza del tornillo se realizó una perforación con una broca 8 mm de diámetro x 1" para luego usar un juego de machos M10 x 1 completando las modificaciones necesarias en el inyector del combustible.

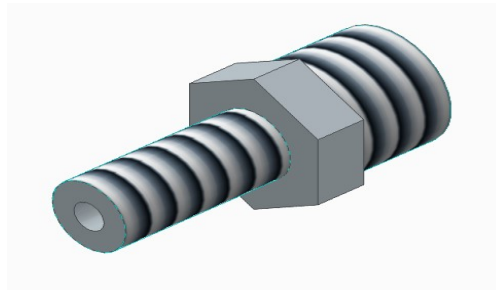


Figura 7. Acople válvula de bola a inyector de GLP. Fuente: Los autores

Para la conexión entre inyector y válvula de bola $\frac{1}{4}$ PN 150 que regulará el caudal de combustible necesario para una correcta combustión, fue necesario adaptar un acople de rosca M8 y por otro lado una rosca de $\frac{1}{4}$ NPT Figura 8.

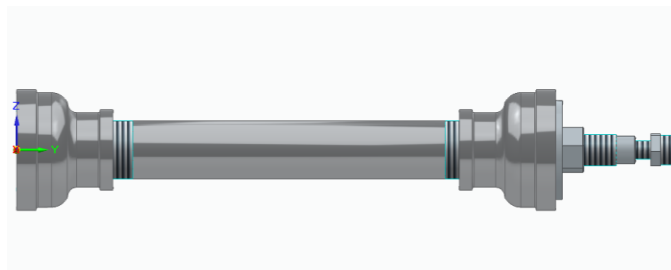


Figura 8. Ensamble prototipo. Fuente: Los autores

Una vez realizadas todas las modificaciones necesarias, se ensambló el prototipo Figura 9., reforzando las uniones de las roscas con teflón para reducir posibilidades de fuga de gas.

C. Fase Pruebas en terreno con adaptación de quemador:

Utilizando un tanque de GLP de 5kg conectado a una manguera amarilla para gas, fabricada de PVC y refuerzos de polipropileno, esta manguera tiene un acople tipo “espina de pescado” con rosca ¼” NPT y este va a un acople hembra-hembra de ¼” conectado a la válvula de bola inicialmente propuesta. Se inicia la prueba dando apertura de la válvula de paso del tanque en 25% de su capacidad, una vez fijado el porcentaje en el tanque se continúa con la apertura total de la válvula de bola del quemador dando paso al combustible para que fluya a través del inyector que inicialmente tiene un diámetro de 1 mm,



Figura 9. Llama sin entrada de oxígeno. Fuente: Los autores

Con la regulación de aire tipo arandela totalmente enfrentada con la copa de entrada de oxígeno, continuando con la generación de la chispa que inicia el proceso de combustión del gas, arrojando como resultado una quema del combustible sin ningún tipo de mezcla de oxígeno Figura 10. observándose en el tipo y longitud de llama.



Figura 10. Prueba previa a la instalación del reactor pirolítico. Fuente: Los autores



Figura 11. Tipo de llama dependiendo del flujo de aire (Menos oxígeno). Fuente: Los autores

En una siguiente prueba se realiza la apertura al 50% y 100% de la válvula del tanque de GLP, modificando también la distancia del regulador de aire por arandela, en distancias de 0, 5mm, 10 mm y 15 mm, de esta manera obtener 3 tipos de llama diferentes Figura 10. Figura 11. Figura 13. indicando varias características del mezclado combustible-oxígeno, variando su rotación de acuerdo a su forma, velocidad de mezcla.



Figura 12. Tipo de llama dependiendo del flujo de aire (Más oxígeno). Fuente: Los autores



Figura 13. Llama de acuerdo al tipo de flujo de aire. Fuente: Los autores

D. Fase Evaluativa

Se llevaron a cabo pruebas de desempeño en el quemador de combustión de GLP en reactores pirolíticos adaptados para el funcionamiento como laboratorio en la Fundación Universidad de América para probar la eficiencia del quemador de GLP y su versatilidad de adaptación a los procesos de pirólisis. Para evaluar la efectividad del quemador en el reactor pirolítico, se realizaron pruebas de funcionamiento y ajuste de la llama, verificando primero la integridad del quemador y su suministro de gas. Luego, se introdujo agua en el reactor y se aumentó la temperatura hasta el punto de ebullición, ajustando la longitud de la llama según el flujo de aire.



Figura 14. Prueba de quemador en reactor pirolítico. Fuente: Los autores

Se realizan pruebas experimentales utilizando polietileno de alta densidad como material principal. Debido a que el presente proyecto se encuentra fraccionado, la responsabilidad de la fabricación del reactor pirolítico recae en otra área. Sin embargo, se espera que, una vez finalizada la construcción del reactor, se lleven a cabo las pruebas con el material para evaluar su comportamiento en el proceso de pirólisis junto al quemador fabricado anteriormente.

III. RESULTADOS

Las pruebas realizadas en campo demostraron el correcto funcionamiento del quemador de GLP de premezcla a presión con regulación de aire primario por arandela. Según la revisión bibliográfica fueron seleccionados parámetros de diseño, que permiten cumplir con los requerimientos de fabricación de un quemador de GLP atmosférico de premezcla a presión con regulación de aire primario por arandela.

- **Selección Coeficiente de descarga inyector.**

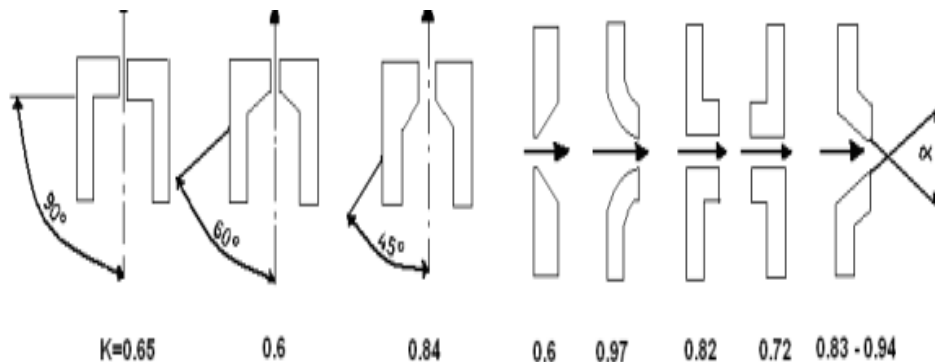


Figura 15. Coeficientes de descarga tipos de inyector [16].

Características como el diámetro del inyector, distancias de pared son determinantes para obtener el caudal del GLP, según la Figura 16. La variación del ángulo de salida de cada inyector permite obtener la variación del coeficiente de descarga.

- **Diámetro del inyector.**

$$D = \sqrt{\frac{\dot{Q}}{0.01139 \cdot C \cdot PCS \cdot \sqrt{\frac{P}{\rho}}}} \quad \text{ec. (1)}$$

Q: potencia (kW)
C: coeficiente de descarga del inyector
D: diámetro del inyector (mm)
P: presión absoluta del gas en (mm ca)
ρ: densidad relativa del gas
PCS: poder calorífico del gas en (kcal h / m³)

$$D = 0,958mm$$

Seleccionada una potencia en $Q=20kW$ de un quemador con características similares al diseñado, es posible realizar el cálculo del diámetro necesario para el inyector ec (1). Obteniendo como resultado un diámetro del orificio de salida del inyector de 1m, estando dentro del rango de coeficiente de descarga Figura 16.

- **Presión del GLP en el inyector.**

La presión del gas en un punto específico varía de acuerdo a diversos factores ec. (2) como la temperatura del gas, composición del combustible y volumen por el cual transcurre dicho elemento ec (3). En este caso ubicando la cabeza de salida del inyector como referencia.

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \quad \text{ec. (2)}$$

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad \text{ec. (3)}$$

$$P = 546270,54 Pa$$

$$P = 546,27 kPa$$

P: presión (kPa)
n: número de moles del GLP
R: constante universal de los gases ideales (J/mol·K)
T: temperatura del gas en K (kelvin)
V: densidad relativa del gas (m³)

- **Potencia del Gas a la salida del inyector.**

$$Q = 0.01139 \cdot CV \cdot \phi^2 \cdot \sqrt{\frac{Pr}{\rho r}} \cdot PCS \quad \text{ec. (4)}$$

$$Q = 40455,63 \frac{kCal h}{m^3} * \frac{1 kCal h}{860 kW}$$

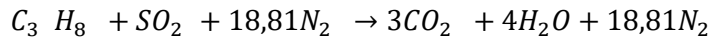
$$Q = 47,0414 kW$$

Q: potencia (kW)
CV: coeficiente de descarga del inyector
φ: diámetro del inyector (mm)

P_r : presión absoluta del gas en ($mm\ ca$)
 ρ_r : densidad relativa del gas
 PCS : poder calorífico del gas en ($kcal\ h / m^3$)

- **Relación estequiométrica GLP y aire.**

Reacción al 100%



1 mol Gas combustible.

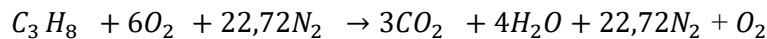
$$\begin{aligned} H: & 1 \frac{g}{mol} \cdot 8 = 8 \frac{g}{mol} \\ C: & 12 \frac{g}{mol} \cdot 3 = 36 \frac{g}{mol} \\ C_3 H_8 & = 44 \frac{g}{mol} \end{aligned}$$

1 mol Aire.

$$\begin{aligned} O_2 : & 32 \frac{g}{mol} \cdot 5 = 160 \frac{g}{mol} \\ N_2 : & 28 \frac{g}{mol} \cdot 18,81 = 526 \frac{g}{mol} \\ Aire = O_2 + N_2 & = 686 \frac{g}{mol\ aire} \end{aligned}$$

$$44 \frac{g}{mol} \text{ de } C_3 H_8 \text{ Rx con } 686 \frac{g}{mol\ aire}$$

Balanceo de la ecuación con un exceso del 20% aire.



Cálculo de la masa del propano.

$$C_3 H_8 = 44,056 \frac{kg}{kmol}$$

Cálculo de la masa del aire.

$$Aire = O_2 + N_2 = 510,2322 \frac{kg}{kmol\ aire}$$

- **Relación aire combustible.**

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad \text{ec. (5)}$$

$$AC = 11.58 \frac{kg\ aire}{kg\ comb}$$

Según masas de aire y combustible obtenidas por medio del balance estequiométrico con un porcentaje de exceso de aire del 20% se determina que para poder quemar un kilogramo de combustible GLP se necesitan 11.58 kg aire a lo largo del proceso de combustión ec. (5).

• **Cálculo de la velocidad de salida del gas a la salida del inyector.**

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{v_1^2 \rho}{2} = P_2 + \rho g z_2 + \frac{v_2^2 \rho}{2} \quad \text{ec. (6)}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2) + 2g(z_1 - z_2)}{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \quad \text{ec. (7)}$$

P_1 : Presión máx servicio (kPa)

P_2 : Presión atm Bogotá (kPa)

g : gravedad (m/s^2)

z_1 : distancia media del inyector (mm)

z_2 : distancia punto superior del inyector (mm)

d_1 : diámetro entrada del inyector (mm)

d_2 : diámetro salida del inyector (mm)

$$v_2 = 56,47 \text{ m/s}$$

Se tienen en cuenta las secciones en las que se divide el quemador y así hallar las reducciones de velocidad en cada punto de salida, teniendo en cuenta aporte de flujo de aire y proporción del gas combustible ec. (7).

Estimando una velocidad del combustible a la salida del inyector de 56,47 m/s.

Dando paso al cálculo de la velocidad de salida de la mezcla en boca del inyector ec. (8).

$$v_3 = \frac{v_2 \cdot r_2^2}{r_3^2} \quad \text{ec. (8)}$$

$$v_3 = 17,76 \text{ m/s}$$

La velocidad de mezcla a la salida de la boca del quemador es de 17,76 m/s.

• **Cálculo del flujo de calor del aire caliente generado.**

$$P \cdot A \cdot V = \dot{m} \cdot R \cdot T \quad \text{ec. (9)}$$

P : presión (kPa)

A : área (m^2)

\dot{m} : flujo másico.

R : constante universal de los gases ideales ($J/mol \cdot K$)

T : temperatura en K (*kelvin*)

v : velocidad (m/s)

V : Volumen (m^3)

$$A = \pi \cdot r^2 \quad \text{ec. (10)}$$

$$A = 2,09116 \cdot 10^{-3} m^2$$

Se considera la longitud de la boca de salida del quemador y la altura de la ciudad de Bogotá.

Flujo másico del aire a la salida del quemador ec. (11).

$$\dot{m} = \frac{P \cdot A \cdot V}{R \cdot T} \quad \text{ec. (11)}$$

$$\dot{m} = 0,01380 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- **Cálculo del flujo de calor a la salida del quemador.**

$$Q = \dot{m} \cdot h \quad \text{ec. (12)}$$

$h = \text{entalpía (KJ/Kg)}$

$Q = \text{Calor a la salida del quemador}$

Para la selección de la entalpía es necesario estimar una temperatura a la salida del quemador de 700 K, temperatura usada en el proceso de pirólisis convencional, según la tabla de propiedades del aire como gas ideal [44] se obtiene un resultado de 713,27 kJ/kg.

$$Q = 9.849 \text{ kW}$$

- **Cálculo de eficiencia térmica del quemador.**

Se obtiene la expresión de la eficiencia por medio del cálculo de la energía útil y la energía de entrada considerándose como la entrada de calor nominal o calor que es obtenido de la mezcla ec. (13).

$$\eta_{Ter} = \frac{Q_{util}}{Q_{Entrada}} \quad \text{ec. (13)}$$

$$\eta_{Ter} = 49,24\%$$

IV CONCLUSIONES

La investigación demostró que el diseño del quemador de GLP de premezcla a presión con regulación de aire primario es una solución viable para la combustión en un reactor pirolítico a nivel de laboratorio. El quemador cumple con los requisitos de funcionalidad y muestra un buen desempeño en potencia térmica, eficiencia de combustión, estabilidad de la llama, emisiones contaminantes y seguridad.

Se garantizo un suministro de entrada de aire primario del 20% con un área de capacitación de 526.072mm², esto da paso a obtener una velocidad de salida del quemador 17.76 m/s con una presión de entrada al quemador o una presión de servicio brindada de 1654 kPa.

Los parámetros de combustión teóricos definidos según la investigación realizada son: diámetro del inyector de 1 mm con potencia teórica de 47.04 kW, lo que demuestra una capacidad adecuada para satisfacer las necesidades de calentamiento. presión de GLP a la salida del inyector entre 546.27kPa y admisión de aire para combustión completa con 120 % de exceso de aire

El diseño del quemador logra una eficiencia del 49.8%, lo que indica una buena utilización del combustible para generar calor útil.

La regulación del aire primario por arandela permite un control preciso de la mezcla aire-combustible, lo que contribuye a una combustión eficiente y a la reducción de emisiones contaminantes.

El quemador atmosférico de premezcla es una opción adecuada para aplicaciones donde se requiere una llama estable y uniforme, como en calentadores domésticos o industriales.

V AGRADECIMIENTOS

El logro de este proyecto ha sido posible gracias al invaluable apoyo de profesionales, cuya dedicación y conocimientos han dejado una huella significativa. Los autores expresan el sincero agradecimiento a cada uno de ellos:

Agradecimientos al Ingeniero Edgar Arturo Chala Bustamante Docente de Ingeniería Mecánica de la FUA, por su destacada contribución en brindar conceptos técnicos y recomendaciones a la hora de elegir correctamente las herramientas necesarias para la fabricación.

Agradecimientos al Ingeniero Rolando Soler Acosta Docente de Ingeniería Mecánica de la FUA, por su destacada contribución en la guía para el maquinado de tornillos y perforaciones necesarias en la fabricación del quemador.

Agradecimientos al Ingeniero Jorge Rene Silva, Decano de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás de Aquino y sus docentes cuya orientación y apoyo fueron fundamentales en el proceso de socialización de este proyecto.

VI REFERENCIAS

- [1] <http://hdl.handle.net/10662/4377> Reducción de las emisiones asociadas a la combustión y pirólisis de biomasa mediante diversos métodos
- [2] Johana Marcela amarís 1, Diego Antonio Manrique2, Julián Ernesto Jaramillo3*, Ed., Biocombustibles Líquidos En Colombia Y Su Impacto En Motores De Combustión Interna. Una Revisión, vol. 13. El Reventón energético, 2017.
- [3] Castells, X. E., & García, E. V. (2012). La pirolisis: Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos.
- [4] D. Trejo, J. F. Garcia, and C. G. Antonio, Conversión de residuos a biocombustibles, https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/70_1/PDF/ResiduosBiocombustibles.pdf (accessed May 15, 2024).
- [5] Oliver Gao, H., & Stasko, T. H. (2009). Cost-minimizing retrofit/replacement strategies for diesel emissions reduction. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 14(2), 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.11.006>
- [6] Mancheno, M., et. al. 2016. Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 23(1): 53–59. ISSN impreso: 1390-3799. ISSN electrónico: 1390-8596.
- [7] “Poder calorífico”, *Todo Luz y Gas*, 23-mar-2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.todoluzygas.es/gas/diccionario/p/poder-calorifico>. [Consultado: 06-may- 2023].
- [8] L. M. Q. Lozano, “Desarrollo de tratamientos térmicos sostenibles para la valorización del plástico procedente de la fracción rechazo de las plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos”, Universidad de Granada, 2021
- [9] K. J. D. Marimon, “Análisis del proceso de pirólisis para la obtención de combustible a partir de residuos plásticos”, Universidad Antonio Nariño, Bogotá D.C, Colombia., 2022..
- [10] J. A. Rodriguez and M. M. Tunjacipa, Uamerica, <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9162/1/6172314-2023-1-IQ.pdf> (accessed May 15, 2024).

- [11] Aimplas, Ed., “Pirólisis: Método Termoquímico para la Transformación de residuos,” AIMPLAS, <https://www.aimplas.es/blog/pirolisis-el-metodo-termoquimico-para-la-transformacion-sostenible-de-los-residuos/> (accessed May 15, 2024).
- [12] Otto Fernando Balseca-Sampedro I, Sócrates Miguel Aquino-Arroba, Stalin Wladimir Chela-Hinojosa, Juan Daniel Figueroa-Moreno., Ed., Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir de: PP, PE, Y PS, vol. 6. Pol. Con., 2021.
- [13] Jessika Andrea Cantor Mayerly Andrea Peña cuta, “Revisión De Los Procesos Para La Producción De Combustibles Provenientes De Residuos Plásticos”, Universidad Antonio, Bogotá D.C, 2021.
- [14] Jayo, S., & Yolanda, J. (2022). Diseño de un quemador semi-industrial que opere con gas licuado de petróleo a nivel de Lima. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [15] Presentado a la ilustre. (s/f). Ucv.ve. Recuperado el 9 de octubre de 2023, de <http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/15504/1/TEG%20Amelia%20Sierra.pdf>
- [16] Martínez, M. M. (2005). Combustión y quemadores (No. 1). Marcombo.
- [17] Castro Giráldez, M.; Tomás Egea, JÁ.; Ortolá Ortolá, MD.; Fito Suñer, PJ. (2018). Comparación de combustibles utilizados en quemadores industriales acoplados a un secador. <http://hdl.handle.net/10251/104147>
- [18] O. H. Alvarez, Emisiones provocadas por combustión de Glp a partir de ..., <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/download/62/61/215> (accessed May 15, 2024).
- [19] J. A. Llamuca Paguay and L. C. Velastegui Quisimalin, “Análisis de Parámetros de combustión en prototipo de Quemador Radiante de Glp Experimental sin recuperación y su influencia sobre el Aprovechamiento Energético,” Repositorio Universidad Técnica de Ambato: Página de inicio, <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/39499> (accessed May 15, 2024).
- [20] J. E. D. S. Jorge Alejandro Garnica Silva, “co-eficacia de la estabilización mecánica de la tapia pisada a partir de mallas de refuerzo de botellas PET”, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, 2023.
- [21] X. M. Campoverde Jara, “Obtención y Valoración de Combustible Líquido por medio de pirólisis, a partir de residuos Sólidos domésticos,” Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: Página de inicio, <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12769> (accessed May 15, 2024).
- [22] F. Jimenez, “Sistemamid,” La Seguridad en la distribución y manipulación del G.L.P., https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-20_08-53-58105661.pdf (accessed May 15, 2024).