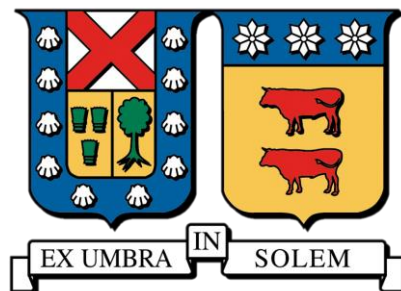


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAISO – CHILE



**“INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL
DE REACTORES DE MEDIO POROSO INERTE
DE GEOMETRÍA CÓNICA”**

SEBASTIÁN ANDRÉS ARMIJO MINOLETTI

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. RODRIGO CASSINELI

MARZO – 2024

Resumen

En el presente informe se detalla la investigación experimental de dos reactores de medios porosos inertes de geometría cónica, con un ángulo de divergencia de 15° para el reactor *A* y de 30° para el reactor *B*. Para llevar a cabo esta investigación se diseñó y construyó un banco de pruebas de reactores de medios porosos inertes para ensamblar los reactores, en el reactor *A* se realizaron pruebas con una velocidad de filtración de 0,63 [m/s] y 0,6 [m/s] en un rango de relaciones de equivalencia de 0,35 a 1; en el reactor *B* se realizaron pruebas con una velocidad de filtración de 0,9 [m/s] en un rango de relaciones de equivalencia de 0,4 a 1.

En ambos reactores se midieron temperaturas a lo largo del reactor con termocuplas de Platino – Rodio situadas en varillas de cerámica transversales al eje central y un módulo adquisidor de datos OMEGA, además en el reactor *B* se midió la variación radial de la temperatura para estudiar el efecto de la geometría cónica en esta variable.

Se calcularon las velocidades del frente de combustión en ambos reactores para todo el rango de relaciones de equivalencia y velocidades de filtración, además se determinó el rango de estabilización de la combustión en ambos reactores según la relación de equivalencia utilizada, para el reactor *A* se obtuvo un rango de estabilización para relaciones de equivalencia de 0,4 a 0,6, y en el reactor *B* de 0,5 a 0,6.

Abstract

The present report delineates the experimental investigation conducted on two inert porous media reactors of conical geometry, featuring a divergence angle of 15° for reactor A and 30° for reactor B. To execute this research, a test bench for inert porous media reactors was designed and constructed to facilitate the assembly of the reactors. In the case of reactor A, tests were conducted employing filtration velocities of 0.63 [m/s] and 0.6 [m/s] across a spectrum of equivalence ratios ranging from 0.35 to 1, whereas for reactor B, tests were undertaken with a filtration velocity of 0.9 [m/s] spanning equivalence ratios from 0.4 to 1. Temperature measurements along the reactor were acquired in both reactors utilizing Platinum-Rhodium thermocouples positioned on ceramic rods perpendicular to the central axis, coupled with an OMEGA data acquisition module. Additionally, radial temperature variation was assessed in reactor B to investigate the impact of conical geometry on this variable.

Calculation of combustion front velocities was conducted for both reactors, encompassing the full gamut of equivalence ratios and filtration velocities. Furthermore, the range of combustion stabilization was delineated for each reactor based on the equivalence ratio employed, revealing a stabilization range of 0.4 to 0.6 for reactor A and 0.5 to 0.6 for reactor B.

Índice general

1.	Introducción y motivación	1
2.	Objetivos	4
2.1.	Objetivo general.....	4
2.2.	Objetivos específicos	4
3.	Marco teórico	5
3.1.	Combustión en medios porosos inertes.....	5
3.1.1.	Descripción de un quemador MPI.....	5
3.1.2.	Velocidad de deflagración laminar (S_L)	6
3.1.3.	Número de Péclet	7
3.1.4.	Llama estable en MPI.....	8
3.1.5.	Descripción física de la transferencia de calor en MPI	10
3.2.	Materialidad y morfología quemadores de MPI	12
3.3.	Geometría cónica en reactores de MPI	13
3.4.	Condiciones indeseadas	15
4.	Diseño y procedimiento experimental.....	16
4.1.	Diagrama del banco de pruebas	16
4.2.	Diseño de los reactores	17
4.3.	Materiales	19
4.3.1.	Trampa de llama.....	19
4.3.2.	Aislante térmico.....	20
4.3.3.	Esferas de alúmina.....	21
4.3.4.	Termocuplas	21
4.3.5.	Varillas de cerámica	22
4.4.	Equipos	22
4.4.1.	Compresor de aire.....	22
4.4.2.	Filtro de aceite	23
4.4.3.	Trampa de Agua	23
4.4.4.	CFM usado en aire.....	24
4.4.5.	CFM usado en GLP.....	25
4.4.6.	Módulo de adquisición de datos	25
4.4.7.	Fusionadora de termocuplas	26

4.5.	Fase constructiva.....	27
4.5.1.	Fabricación de estructura reactores	27
4.5.2.	Soporte del reactor.....	27
4.5.3.	Inyección de GLP-Aire.....	28
4.5.4.	Cámara de premezcla	29
4.6.	Montaje Final.....	29
4.7.	Parámetros de operación.....	30
4.7.1.	Relación de equivalencia y aire-combustible	30
4.7.2.	Velocidad de Filtración	30
4.7.3.	Estequiometría de GLP-Aire	30
4.7.4.	Cálculo de Flujos.....	31
4.7.5.	Potencia térmica	32
4.8.	Protocolo de Seguridad, Encendido y Apagado del Banco de Pruebas.	33
4.8.1.	Seguridad.....	33
4.8.2.	Encendido.....	33
4.8.3.	Apagado.....	34
4.9.	Pruebas experimentales.....	34
4.9.1.	Reactor cilíndrico	34
4.9.2.	Reactor cónico de 15°	35
4.9.3.	Reactor cónico de 30°	36
5.	Presentación y análisis de resultados	38
5.1.	Reactor cilíndrico.....	38
5.1.1.	Perfiles térmicos para distintas relaciones de equivalencia.....	38
5.1.2.	Velocidades del frente de combustión.....	42
5.1.3.	Estabilización de la combustión	43
5.2.	Reactor Cónico 15°.....	44
5.2.1.	Frente de combustión viajando aguas arriba con $V_{\text{filt}}= 0,63$ [m/s].	44
5.2.2.	Frente de Combustión viajando aguas abajo con $V_{\text{filt}}= 0,63$ [m/s].	45
5.2.3.	Frente de Combustión estabilizado con $V_{\text{filt}}= 0,63$ [m/s].	46
5.2.4.	Frente de Combustión viajando aguas arriba con diferentes V_{filt}	47
5.2.5.	Frente de Combustión estabilizado con diferentes V_{filt}	48
5.3.	Reactor Cónico 30°	49
5.3.1.	Frente de Combustión viajando aguas arriba.	49
5.3.2.	Frente de Combustión viajando aguas abajo.	50

5.3.2.1. Frente de Combustión estabilizado.	51
5.3.3. Variación Radial de la temperatura.	52
6. Conclusiones	55
7. Bibliografía.....	57

Índice de imágenes

Imagen 1: Consumo mundial de energía en cuatrillones de BTU, separando países dentro y fuera de la OCDE. [1].....	1
Imagen 2: Consumo mundial por fuente de energía primaria en cuatrillones de BTU. [1] ...	2
Imagen 3: Esquema de la combustión en un MPI. [3].....	6
Imagen 4: Representación de la velocidad de deflagración laminar (S_L). [4]	6
Imagen 5: Estabilización de una llama de premezcla en MPI. [4]	8
Imagen 6: Representación de combustión sumergida en un MPI. [5].....	9
Imagen 7: Quemadores con llama estabilizada en la superficie. [4]	10
Imagen 8: Representación modo de combustión en superficie y sumergida, de izquierda a derecha. [4]	10
Imagen 9: Esquema del principio de recirculación del calor en MPI [4]	11
Imagen 10: Tabla propiedades alúmina, carburo de silicio y zirconio. [6]	13
Imagen 11: Diferentes estructuras porosas de alúmina. [7].....	13
Imagen 12: Diagrama quemador de MPI divergente [8]......	14
Imagen 13: Modelo 2D del quemador divergente [9].	14
Imagen 14: Condiciones de operación de llama libre, a) retrollama, b) operación estable, c) desprendimiento [10]......	15
Imagen 15: Diagrama de componentes del banco de pruebas de reactores de MPI.....	17
Imagen 16: Diseño 3D estructura reactores, de izq. a dcha. cilíndrico, cónico 15° y cónico 30°.....	18
Imagen 17: Diseño 3D componentes reactores de MPI. (1) Trampa de llama, (2) varilla de cerámica, (3) cámara de premezcla, (4) esferas de alúmina.	19
Imagen 18: Diseño 3D ensamble reactores, de izq. a dcha. cilíndrico, cónico 15° y cónico 30°.....	19

Imagen 19: Trampa de llama instalada al interior del soporte.	20
Imagen 20: Aislante térmico de fibra cerámica.	20
Imagen 21: Esferas de alúmina de 5,6 [mm] de diámetro de un reactor encendido.	21
Imagen 22: Termocupla tipo “S” unida por soldadura.	22
Imagen 23: Varilla de cerámica con termocupla tipo “S”.	22
Imagen 24: Compresor de aire Nitro Compressors.	23
Imagen 25: Filtro de aceite y trampa de agua montados de izq. a dcha.	24
Imagen 26: Controlador de flujo másico para línea de aire.	24
Imagen 27: Controlador de flujo másico para el GLP.	25
Imagen 28: Módulo de adquisición de datos OMEGA.	26
Imagen 29: Fusionadora de Termocupla encendida.	26
Imagen 30: Estructuras fabricadas de los reactores.	27
Imagen 31: Estructura de soporte reactor.	28
Imagen 32: Conexión para la inyección de GLP y aire.	28
Imagen 33: Esquema de inyección de gases, cámara de premezcla y trampa de llama.	29
Imagen 34: Montaje final del Banco de Pruebas.	29
Imagen 35: Reactor cilíndrico encendido.	35
Imagen 36: Reactor cónico de 15° en pruebas y adquisición de datos.	36
Imagen 37: Vista superior de reactor cónico de 30° en combustión.	37

Índice de tablas

Tabla 1: Dimensiones reactores de MPI.	18
Tabla 2: Especificaciones compresor de aire.	22
Tabla 3: Especificaciones filtro de aceite.	23
Tabla 4: Especificaciones trampa de agua.	23
Tabla 5: Especificaciones controlador de flujo másico para aire.	24
Tabla 6: Especificaciones controlador de flujo másico para GLP.	25
Tabla 7: Especificaciones adquisidor de datos.	25
Tabla 8: Especificaciones máquina fusionadora de termocuplas.	26
Tabla 9: Parámetros de pruebas en reactor cilíndrico para distintas relaciones de equivalencia.	34

Tabla 10: Parámetros de pruebas en reactor cónico de 15° para distintas relaciones de equivalencia.....	35
Tabla 11: Parámetros de pruebas en reactor cónico de 30° para distintas relaciones de equivalencia.....	37

Índice de gráficos

Gráfico 1: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\emptyset=1$ y el frente de combustión viajando aguas arriba.	39
Gráfico 2: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\emptyset=0,95$ y el frente de combustión viajando aguas arriba.	39
Gráfico 3: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\emptyset=0,8$ y el frente de combustión viajando aguas arriba.	40
Gráfico 4: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\emptyset=0,7$ y el frente de combustión viajando aguas arriba.	40
Gráfico 5: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\emptyset=0,5$; el frente de combustión viajando aguas abajo y luego estabilizado entre termocuplas T4 y T5.....	41
Gráfico 6: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\emptyset=0,4$ y el frente de combustión viajando aguas abajo.	41
Gráfico 7: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\emptyset=0,3$ y el frente de combustión viajando aguas abajo.....	42
Gráfico 8: Velocidad del frente de combustión en función de la relación de equivalencia en reactor cilíndrico.....	42
Gráfico 9: Temperaturas a lo largo del reactor cilíndrico con el frente de combustión estabilizado.	43
Gráfico 10: Velocidades del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 15° con $\emptyset=1$ para diferentes pruebas.	44
Gráfico 11: Velocidades del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 15° para diferentes \emptyset	45
Gráfico 13: Velocidades del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 15° para diferentes \emptyset	46

Gráfico 12: Temperatura a lo largo del reactor cónico de 15° con el Frente de Combustión estabilizado para diferentes \emptyset	47
Gráfico 14: Velocidad del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 15° con $\emptyset=1$ para diferentes V_{filt}	48
Gráfico 15: Temperatura a lo largo del reactor cónico de 15° con el frente de Combustión estabilizado para diferentes V_{filt}	49
Gráfico 16: Velocidades del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 30° con $\emptyset=1$ para diferentes pruebas.	50
Gráfico 18: Velocidad del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 30° con $\emptyset=0,4$	51
Gráfico 17: Temperatura a lo largo del reactor cónico de 30° con el Frente de Combustión estabilizado para diferentes \emptyset	52
Gráfico 20: Temperatura de las termocuplas n°2 y n°5, y su diferencia de temperatura en el tiempo en el reactor cónico de 30°.	53
Gráfico 19: Temperatura de las termocuplas n°2 y n°5, y su diferencia de temperatura en el tiempo en el reactor cónico de 30°.	54

1. Introducción y motivación

En la actualidad el consumo de energía está prácticamente ligado a todas las actividades de la humanidad, y sin duda alguna, es impensable un futuro en el cuál no se necesite de la energía para el desarrollo de la sociedad.

Del mismo modo, este consumo no es constante en el tiempo, sino que tiende a crecer, así lo enuncia la *U.S. Energy Information Administration*, quien proyecta que el consumo mundial de energía aumentaría un 50% entre los años 2018 y 2050, el detalle puede observarse a continuación en la *Imagen 1*. [1]

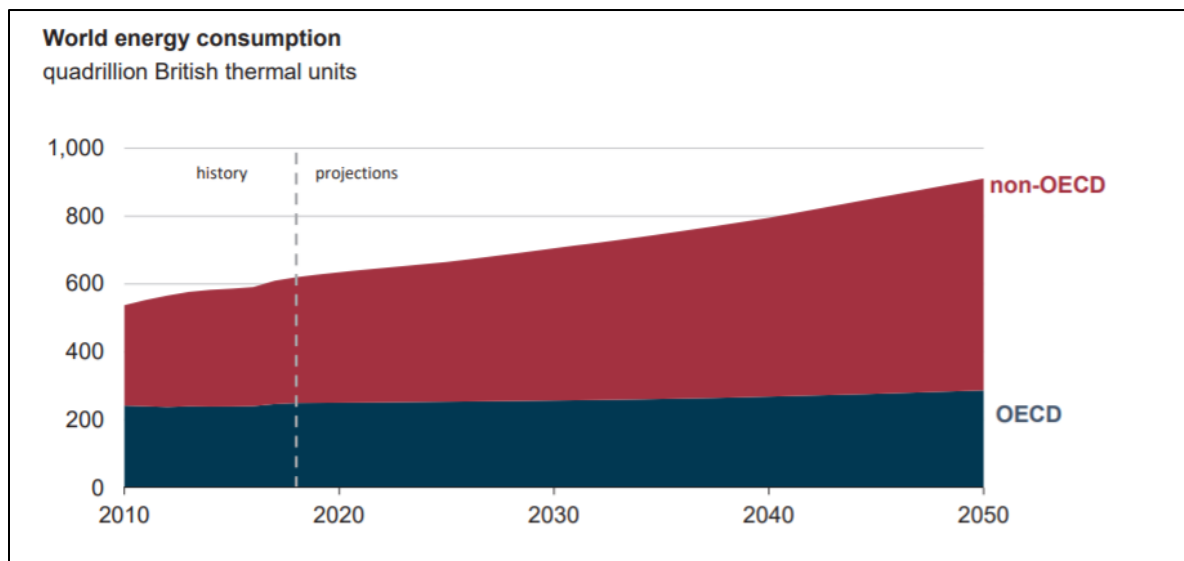


Imagen 1: Consumo mundial de energía en cuatrillones de BTU, separando países dentro y fuera de la OCDE. [1]

Cabe destacar que las proyecciones del consumo energético son hechas en función de casos de referencia, para poder determinarlo se toman varios supuestos respecto al crecimiento económico e industrial global, el precio de los combustibles, desarrollo tecnológico, entre otros. Por lo que, si bien no es una proyección exacta de lo que va a suceder, ya que es incierto, si es un acercamiento en función de dichas variables alternativas.

Es claro que este comportamiento no puede perdurar así indefinidamente, dado que los recursos del planeta son finitos y no se puede pretender un crecimiento infinito, pues dicha pretensión carece de toda lógica, pero sí es un comportamiento esperable para las próximas

décadas. Lo anterior no quiere decir que la sociedad sólo deba atenerse a satisfacer sus necesidades, sino que también a hacerse cargo de las consecuencias que suplir dichas necesidades conlleva. Y en estos momentos el hacerse cargo implica principalmente dos cosas: en primer lugar, hacer una transición para reemplazar las fuentes de energía no renovable por fuentes de energías renovables; en segundo lugar, en todo el proceso de transición energética, hacer más eficientes los procesos de generación y consumo de energías, y disminuir los efectos negativos que traen al medioambiente.

Sobre la transición energética, es muy interesante ver que las proyecciones de la EIA muestran que para el año 2050, en términos porcentuales y agrupando las fuentes de energía como: (1) renovables, (2) petróleo y otros líquidos, (3) carbón, (4) gas natural y (5) nuclear, las energías renovables liderarán como fuentes de energía primaria.

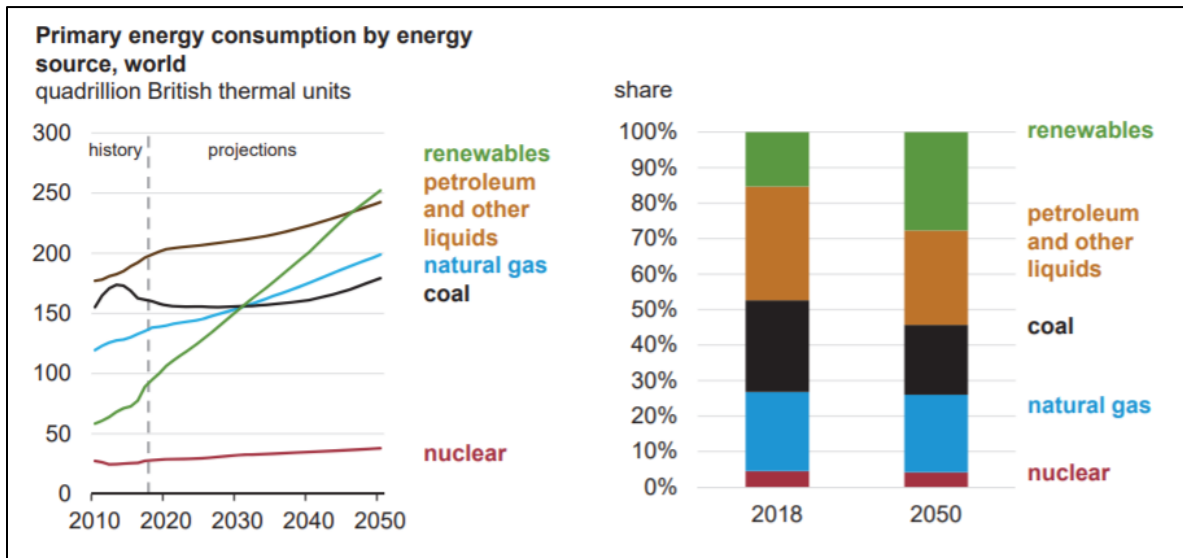


Imagen 2: Consumo mundial por fuente de energía primaria en cuatrillones de BTU. [1]

A primera vista parece ser bastante positivo que las energías renovables se consoliden como líderes de las fuentes de energías primarias, sin embargo, al observar con detenimiento la proyección para cada grupo, vemos que todas tienden a crecer en términos de consumo, por lo que concretamente en las próximas décadas el mundo consumirá aún más energías no renovables. Por lo tanto, es evidente deducir que, si la forma de consumo de estas energías no cambia, aumentarían inevitablemente sus consecuencias negativas para el planeta.

Por otro lado, es relevante tener en cuenta de que estas temáticas pasaron a ser materias de Estado a lo largo de todo el mundo, y nuestro país no es la excepción, el año 2021 se promulgó una ley sobre eficiencia energética. La cual, entre los aspectos más relevantes, plantea elaborar el primer plan nacional de eficiencia energética, con metas para reducir la intensidad de los consumos energéticos en los próximos años. [2]

Y es aquí donde entra la combustión en medios porosos inertes (MPI en adelante), en el poder entregar una solución tangible al uso más eficiente de las energías. Esta tecnología, muy bien lo señala su nombre, se basa en utilizar estructuras porosas de materiales inertes, tales como alúmina, zirconio, carburo de silicio, etc., que poseen una alta conductividad y resistencia térmica, como medio en el cual ocurre la reacción de la combustión.

La crucial ventaja de esta tecnología es que se caracteriza principalmente por optimizar el proceso de combustión mediante la intensificación de los mecanismos de transferencia de calor, generando una recirculación del calor y, en definitiva, un mejor aprovechamiento de los combustibles utilizados, además de reducir notablemente las emisiones contaminantes, o sea una tecnología eficiente energéticamente.

Dentro de las múltiples aplicaciones que esta tecnología tiene hasta el momento, se pueden categorizar principalmente en dos grandes áreas: por un lado, generación o transferencia de calor mediante el uso de mezclas pobres en combustible y, por otro lado, oxidación parcial de combustibles o generación de gas de síntesis mediante mezclas ricas en combustible.

Este documento se centra en la primera área de aplicación mencionada, ya que consiste en el diseño, construcción y posteriores pruebas experimentales de un banco de pruebas de quemadores de MPI, estudiando específicamente el fenómeno de estabilización de la combustión dentro de la matriz porosa.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

La estabilización de un frente de combustión en reactores de medio poroso inerte es un tópico de investigación que permite aplicar esta tecnología en diferentes procesos industriales. El objetivo general del presente trabajo es diseñar y construir dos reactores de medio poroso inerte de geometría cónica, con una inclinación de 15 y 30 grados, de manera de investigar experimentalmente la estabilización de un frente de combustión de la premezcla aire-gas licuado.

2.2. Objetivos específicos

- Reconocer investigaciones en reactores de medio poroso inerte de geometría cónica.
- Diseñar y construir dos reactores de geometría cónica con sistemas de medición y control de flujos y temperaturas.
- Desarrollar pruebas experimentales que permitan establecer rangos de estabilización de frente de combustión de la premezcla aire-gas licuado.
- Proponer mejoras de diseño y operación para reactores de medio poroso inerte de geometría cónica.

3. Marco teórico

3.1. Combustión en medios porosos inertes

3.1.1. Descripción de un quemador MPI

El uso de medios porosos inertes como quemadores nace de la necesidad de mejorar las propiedades de la combustión en llama libre. La premisa de lo anterior es que se puede sopesar la mala conductividad de los gases al agregar una matriz sólida en el lugar donde ocurre la combustión. Las características principales de dicha matriz es que sea de un material de alta conductividad, que tenga una elevada resistencia térmica, una alta porosidad que permita el paso del flujo de gases de la mezcla aire – combustible y la generación de múltiples llamas dentro de la matriz porosa.

Para poder explicar esto de mejor manera, la *Imagen 3* será útil como apoyo, en esta se puede apreciar un diseño esquemático de la combustión en una matriz porosa. En esta fluye una premezcla de aire – combustible que es inyectada desde la parte inferior. Con claridad se puede apreciar que existen dos regiones de distinta porosidad en esta matriz; la región A, ubicada aguas arriba, donde se genera una zona de precalentamiento de los gases; y la región C, ubicada aguas abajo donde ocurre la combustión y se genera un equilibrio térmico local donde la temperatura del sólido y del gas son prácticamente equivalentes. Es entre estas dos zonas donde ocurre la estabilización de la combustión, la cual depende de características de diseño, como la porosidad y diámetro del poro, y de parámetros de operación, como velocidad de inyección de la mezcla y relación de equivalencia, más adelante se abordará en qué consiste el fenómeno de estabilización. Por otro lado, también se puede notar el perfil de temperatura del quemador, en donde se aprecia el salto térmico en la zona de combustión y el efecto del precalentamiento, esto producto de la intensificación de todos los mecanismos de transferencia de calor y a la recirculación del calor.

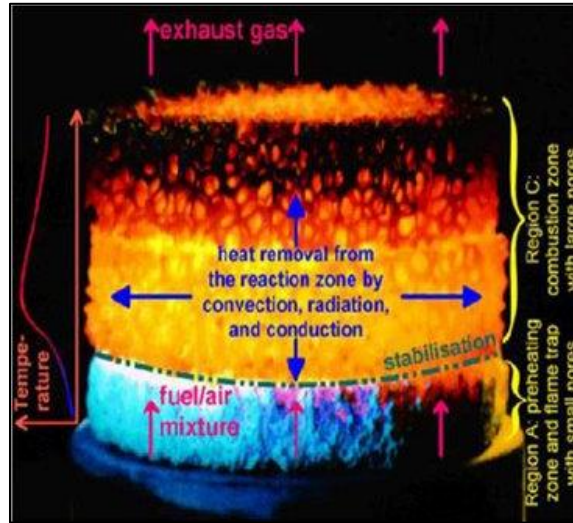


Imagen 3: Esquema de la combustión en un MPI. [3]

3.1.2. Velocidad de deflagración laminar (S_L)

Dentro de los primeros conceptos para poder entender la estabilización de la combustión en MPI está la velocidad de deflagración laminar (S_L), esta corresponde básicamente a la velocidad a la cual se propaga una llama dentro de un tubo adiabático que contiene una mezcla de gases combustibles y donde se enciende una chispa en un extremo, tal como se puede apreciar en la *Imagen 4*.

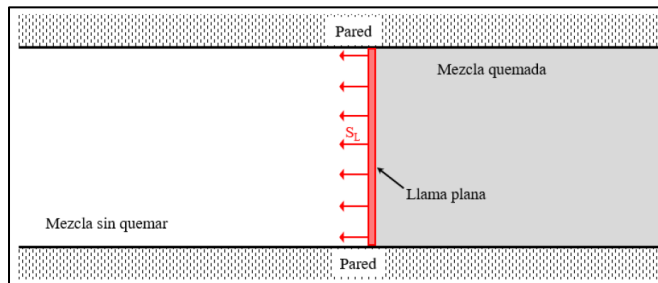


Imagen 4: Representación de la velocidad de deflagración laminar (S_L). [4]

Se puede afirmar que S_L es función de tres propiedades características de la mezcla sin combustión: la conducción del calor, la difusividad másica y las propiedades cinéticas. Por otro lado, es importante mencionar que este parámetro es utilizado para

caracterizar distintos fenómenos de la combustión, como son los casos de *retrollama*, *apagado de llama* o *propagación de llamas turbulentas*.

3.1.3. Número de Péclet

Este es un número adimensional que compara la transferencia de calor por convección, es decir, desde el gas hacia el sólido poroso, con la transferencia de calor por conducción en el gas. Lo anterior se hace más intuitivo de entender si es que se pone atención a la ecuación que determina este número:

$$Pe = \frac{\rho_u c_p S_L d_{pcr}}{k} = \frac{S_L d_{pcr}}{D_T} \quad (3.1)$$

Donde ρ_u , c_p , S_L , d_{pcr} , D_T y k son la densidad, el calor específico, la velocidad de deflagración laminar, el diámetro de poro crítico, la difusividad térmica y la conductividad, respectivamente.

Por lo tanto, de esta ecuación, y de lo mencionado anteriormente, se puede deducir que, para valores bajos de Pe , el término de conducción se vuelve pequeño y predomina el efecto de la convección hacia el sólido, de la misma forma, para valores altos de Pe , predomina el efecto de la conducción en el gas. La traducción en la realidad sobre las dos situaciones descritas es que, para el primer caso ocurre una extinción de la llama, debido a que la matriz porosa finalmente absorbe el calor necesario para que en el gas se mantenga la combustión, para el segundo caso, como es de suponer, sucede lo contrario. Es por esto por lo que de forma experimental se ha comprobado que para el caso específico del metano el número crítico de Péclet es $Pe_{cr} = 65$.

3.1.4. Llama estable en MPI

En función de los conceptos vistos, es posible darse cuenta de que es factible generar un proceso de combustión en una matriz porosa, y más aún, el poder estabilizar el frente de llama en una posición específica. Para lograr estabilizar una llama en un MPI se deben cumplir ciertos aspectos, principalmente lo que se busca es que la velocidad del frente de combustión sea cero ($v_{fc}=0$). Es por esto por lo que, además de asegurar poseer las propiedades que permitan que exista llama dentro del MPI ($Pe > Pe_{cr}$), se debe procurar que la velocidad de entrada de la premezcla sea tal que genere la permanencia del frente de llama en el interior del MPI, es decir que no se mueva aguas arriba ni aguas abajo. Esta situación se ilustra en la *Imagen 5*.

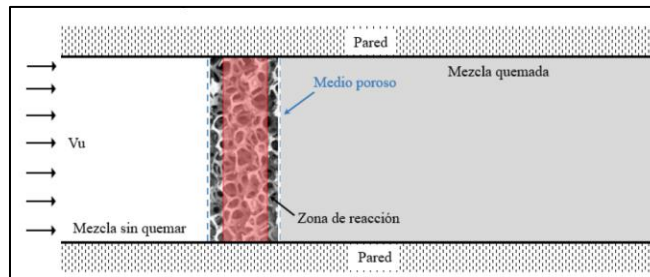


Imagen 5: Estabilización de una llama de premezcla en MPI. [4]

Según dónde se estabilice la llama, es posible clasificar los quemadores. Dentro de las configuraciones más utilizadas están los quemadores de *Combustión Sumergida*, tal como se aprecia en la *Imagen 6*, la llama se estabiliza dentro de la matriz porosa, y esto suele generarse mediante la técnica de estabilización donde se establecen dos zonas de diferente porosidad para estabilizar la combustión en medio de esas dos zonas. La primera zona, por donde primero fluye la premezcla de aire – combustible, es una zona en la que hay un menor diámetro de poro, que asegura un número de Péclet menor al crítico, esto con el fin de impedir que la llama se propague aguas arriba ya que se extingue, a esta zona también se le reconoce como *zona de precalentamiento*. La segunda zona, ubicada continua a la primera zona, pero aguas

abajo, es la que posee un diámetro de poro mayor al crítico, tal que permita la existencia de la reacción de combustión dentro de la matriz, a esta zona también se le conoce como *zona de combustión*.

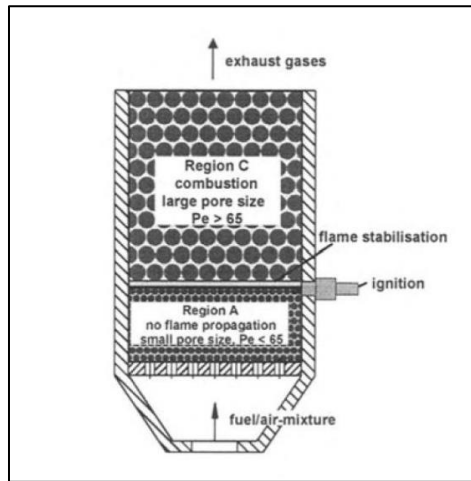


Imagen 6: Representación de combustión sumergida en un MPI. [5]

La otra configuración es la *combustión estabilizada en la superficie*, en la cual sólo se utiliza un medio poroso de bajo diámetro de poro, tal que se garantice un número de Péclet menor al crítico y que con ello la llama no se difunda al interior del MPI, generando una zona netamente de precalentamiento en la matriz porosa y obteniendo así que se mantenga estabilizada en la superficie, tal como se puede observar en la *Imagen 7*.

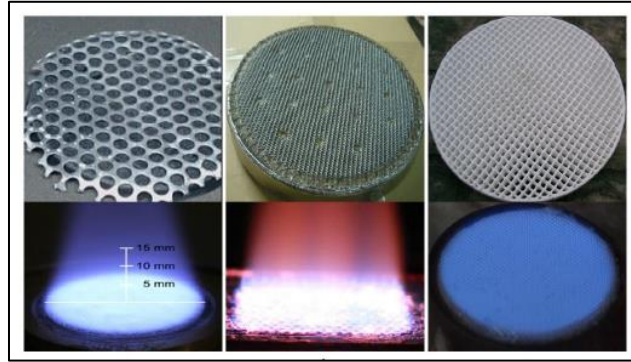


Imagen 7: Quemadores con llama estabilizada en la superficie. [4]

A modo de comparación, en la *Imagen 8* se puede apreciar ambos modos de combustión esquematizados, y en estos se puede notar claramente cómo se diferencian las zonas de combustión y precalentamiento al observar su perfil de temperatura a lo largo de cada matriz porosa.

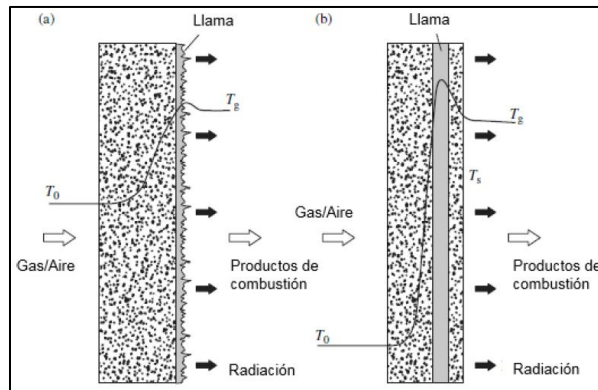


Imagen 8: Representación modo de combustión en superficie y sumergida, de izquierda a derecha. [4]

3.1.5. Descripción física de la transferencia de calor en MPI

La principal y particular característica de la transferencia de calor en la combustión en MPI es el llamado *principio de recirculación del calor*. En términos simples, esto se basa en que el calor de los productos de la combustión es “usado” para precalentar los reactivos que aún no han sido quemados, es por esto por lo que se genera una zona de precalentamiento anterior al frente de llama. Lo mencionado se traduce en un salto de entalpía previo al proceso de combustión, dado que los gases ingresan con una

entalpía inicial y luego reciben energía del proceso de recirculación de calor, en la zona de reacción liberan energía térmica y posteriormente una parte de la energía es recirculada. Esto se puede notar en la *Imagen 9*, donde se representa esquemáticamente.

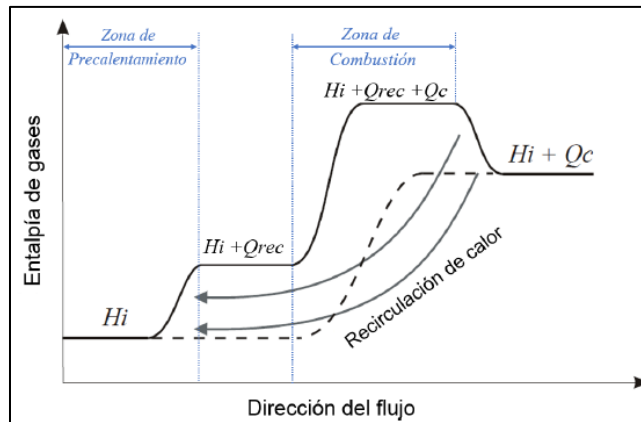


Imagen 9: Esquema del principio de recirculación del calor en MPI [4]

Este principio influye considerablemente en la eficiencia del proceso de combustión, en el consumo de combustible, en la intensidad de la combustión y las emisiones contaminantes.

En cuanto a la interacción entre reacciones químicas y transferencia de calor, se podría explicar separando la fase gaseosa y la sólida, la zona de pre calentamiento y de reacción, además de considerar que el MPI opera con una llama estable y en estado estacionario. Entonces, al situarse en el *gas en la zona de reacción*, este libera entalpía sensible y energía por radiación al ambiente, además de que transfiere calor por convección y radiación al *sólido en la zona de reacción*, quien libera energía por radiación al ambiente y transfiere calor por radiación y conducción al *sólido en la zona de pre calentamiento*, luego este transfiere calor por convección al *gas en la zona de pre calentamiento*, finalmente este mismo gas llega a la zona de reacción para así volver al ciclo que se acaba de mencionar.

3.2. Materialidad y morfología quemadores de MPI

Sin duda alguna, uno de los puntos vitales en los quemadores MPI son las propiedades y características de la matriz sólida, puesto que en definitiva su composición y forma son lo que definirán su comportamiento para este tipo de aplicaciones. Las características deseadas y propiedades a considerar serían las siguientes:

- Resistencia a elevadas temperaturas.
- Resistencia al choque térmico.
- Alta conductividad.
- Alta emisividad.
- Inertes a la reacción química.

Dentro de los materiales más utilizados se podrían nombrar las espumas de carburo de silicio sinterizado (S-SiC), así como las espumas compuestas a base de SiC infiltradas con silicio, y las estructuras tipo mezclador hechas de fibras de alúmina (Al_2O_3) y de espumas de zirconio (ZrO_2). En la *Imagen 10* se puede observar una tabla comparativa de las propiedades de los materiales nombrados.

Por supuesto su forma o estructura también es una característica muy importante, existen muchas con las cuales se logra dar una porosidad a la matriz, entre las más utilizadas se pueden encontrar fibras, espumas, láminas, perlas, entre otras. A modo de ejemplo, en la *Imagen 11* se pueden apreciar diferentes estructuras porosas de alúmina, de izquierda a derecha: una espuma de 10 [ppi] (poros por pulgada), perlas de 13 [mm] de diámetro y estructura tipo pan de 200 [cpsi] (celdas por pulgada cuadrada).

Property	Unit	Al ₂ O ₃	SiC	ZrO ₂
Maximum use temperature in air	°C	1900	1650	1800
Thermal expansion coefficient α (20–1000 °C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	8	4–5	10–13
Thermal conductivity λ at 20 °C	W m ⁻¹ K ⁻¹	20–30	80–150	2–5
Thermal conductivity λ at 1000 °C	W m ⁻¹ K ⁻¹	5–6	20–50	2–4
Specific thermal capacity	J g ⁻¹ K ⁻¹	0.9–1	0.7–0.8	0.5–0.6
Thermal stress resistance parameter, hard shock, R ($\sigma/E\alpha$)	K	100	230	230
Thermal stress resistance parameter, mild thermal shock, R' ($R\lambda$)	10 ⁻³ W m ⁻¹	3	23	1
Total emissivity at 2000 K	–	0.28	0.9	0.31

Imagen 10: Tabla propiedades alúmina, carburo de silicio y zirconio. [6]

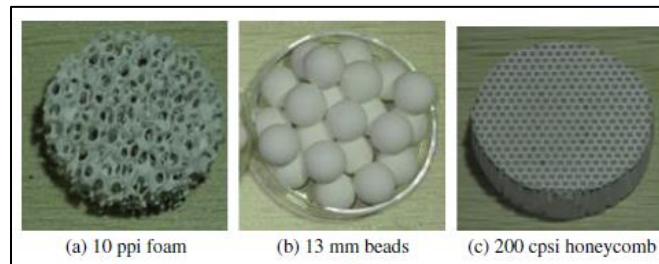


Imagen 11: Diferentes estructuras porosas de alúmina. [7]

3.3. Geometría cónica en reactores de MPI

La geometría es un aspecto muy relevante en los quemadores de MPI, por lo general la configuración más común es utilizar quemadores de geometría cilíndrica. Pero también existen otras configuraciones, uno de los diseños más interesantes es la geometría cónica o divergente, en la cual el quemador se ensancha desde su punto de entrada hasta la salida.

Entre las principales características de esta geometría destacan una serie de ventajas, estos quemadores son más eficientes, tienen llamas más estables y emiten menos contaminantes, como resultado, tienen un gran potencial de aplicación.

Por ejemplo, en la investigación de Bakry et al. [8] se muestra el comportamiento estable de un quemador divergente bajo condiciones de alta presión y temperatura, estableciendo un rango de operación de potencias entre los 5 y 40 [kW] en mezclas pobres, llegando a temperaturas adiabáticas que demuestran una combustión más

eficiente y con menos emisiones contaminantes, además comprobando que esta configuración disminuye la posibilidad de extinción de llama.

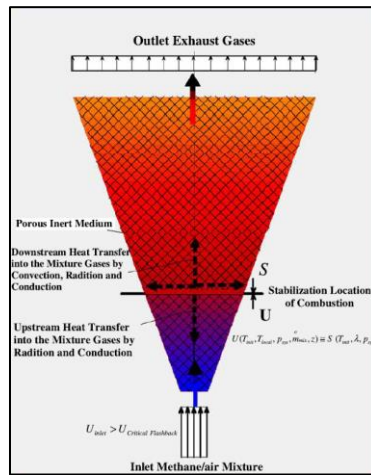


Imagen 12: Diagrama quemador de MPI divergente [8].

Por otro lado, en el estudio de Lin Baiquan et al. [9] se muestra que los límites de parámetros de trabajo de un quemador divergente son más amplios que los del quemador cilíndrico, lo que contribuye a reducir la influencia de la concentración y la fluctuación de volumen de metano de baja concentración. Además, se descubrió una relación directamente proporcional entre la temperatura máxima y las relaciones estequiométricas.

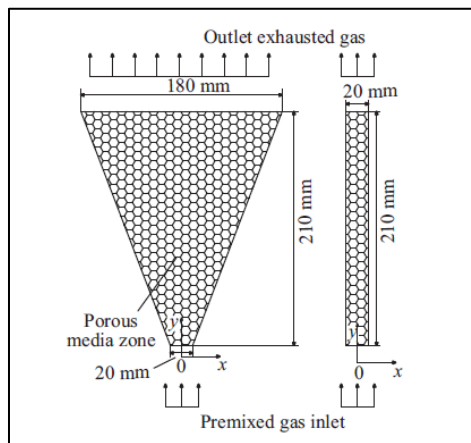


Imagen 13: Modelo 2D del quemador divergente [9].

En resumen, el uso de quemadores de geometría cónica o divergente es una estrategia prometedora que ofrece oportunidades para mejorar la estabilización de la llama y la eficiencia de la combustión en quemadores de medios porosos inertes.

3.4. Condiciones indeseadas

En los quemadores MPI también pueden generarse las condiciones indeseadas características de los dispositivos de premezcla, fenómenos como el apagado de llama (blow-out) y retrollama (flashback) pueden ocurrir dependiendo de las condiciones de operación. La primera, el apagado de llama, sucede cuando el proceso de combustión no es capaz de sostenerse por sí mismo debido a la baja transferencia de calor y masa desde la zona de reacción, ocasionando que la llama se extinga o apague, al comienzo de este proceso suele llamarse *desprendimiento de llama*, este suceso tiene lugar en condiciones de operación pobre o para altos valores de potencia. Para el segundo caso, la retrollama, este fenómeno se presenta cuando el frente de llama logra penetrar el puerto del quemador y reacciona en el mezclador, pudiendo ocasionar una explosión. En la *Imagen 14*, puede observarse los fenómenos mencionados y la operación estable de una llama libre.

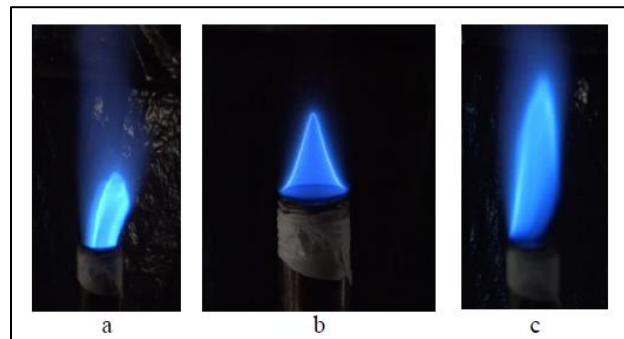


Imagen 14: Condiciones de operación de llama libre, a) retrollama, b) operación estable, c) desprendimiento [10].

4. Diseño y procedimiento experimental

4.1. Diagrama del banco de pruebas

En primer lugar, se diseñó el esquema de instalación de los componentes necesarios para el tratamiento y control de la premezcla GLP-aire. Tal como se puede apreciar en la *Imagen 15*, para el caso del aire, es suministrado a través de un compresor-acumulador que posee un regulador de presión ajustable con manómetro a la salida, este está conectado a una válvula de bola manual para abrir o cerrar el paso del suministro de aire, luego, el aire es tratado a través de un filtro de aceite y una trampa de agua para que ingrese sin impurezas ni humedad al controlador de flujo másico, componente que finalmente regula el caudal de aire suministrado al reactor. De la misma forma, para el caso del GLP, este es suministrado a través de un tanque granel de GLP, a la salida posee un regulador de presión, luego, en la línea de abastecimiento hay una válvula de bola para abrir o cerrar el paso del suministro de gas que ingresa al controlador de flujo másico, componente que regula el caudal de GLP suministrado al reactor. Cabe recalcar que para el caso del GLP no es necesario realizar un tratamiento previo al controlador de flujo másico, ya que este gas es tratado previamente a la carga en el tanque granel.

Así, con los controladores de flujo másico se puede regular la relación de aire-combustible y abastecer de premezcla el reactor de MPI. Luego, en el reactor se tiene un sistema de medición de temperaturas compuesto por termocuplas en su interior, que a su misma vez están insertas en varillas de cerámica para protegerlas del contacto directo con la llama, las termocuplas están conectadas a un módulo adquisidor de datos que mediante un programa nos indica la temperatura al interior del reactor en el punto específico.

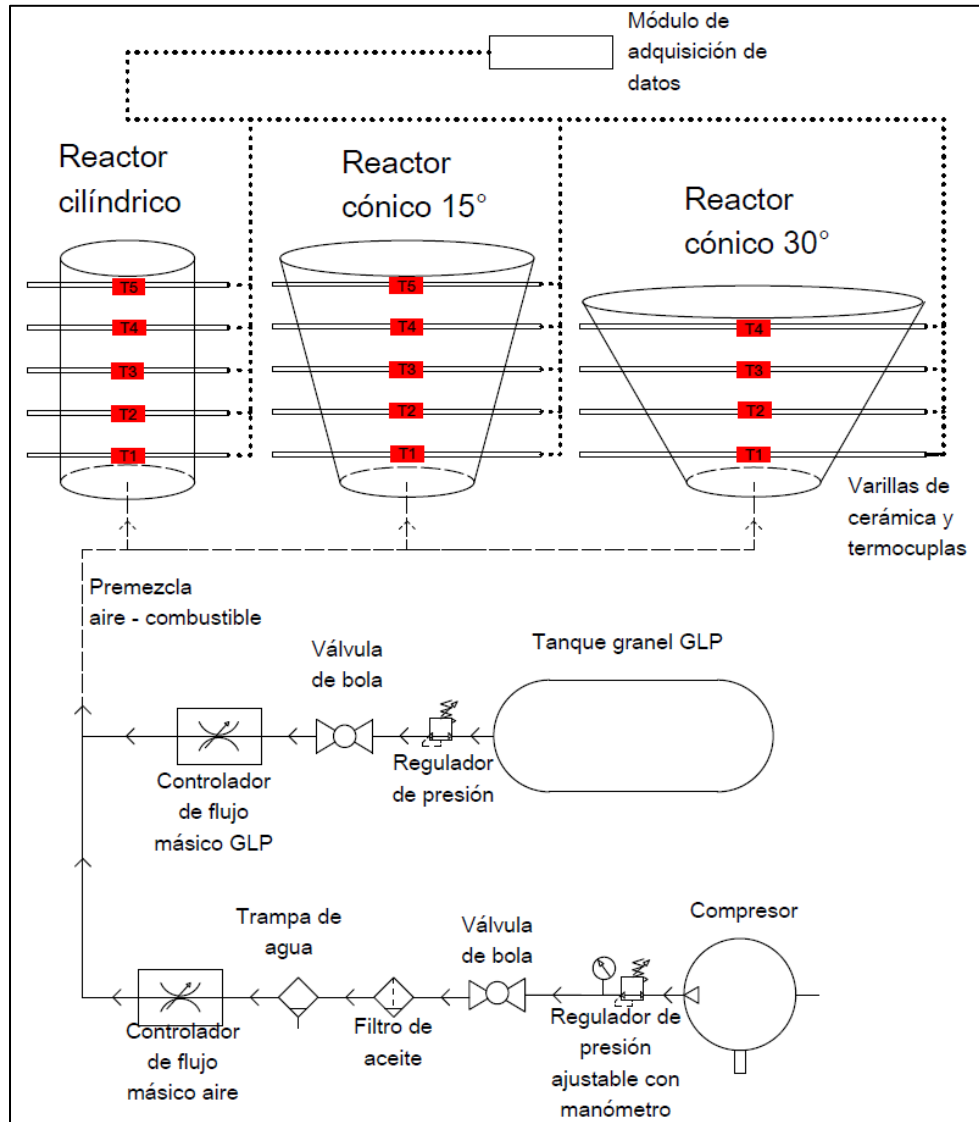


Imagen 15: Diagrama de componentes del banco de pruebas de reactores de MPI.

4.2. Diseño de los reactores

En la fase de diseño se consideraron tres reactores, uno de geometría cilíndrica para establecer una línea experimental base, y otros dos de geometría cónica, de 15° y 30° de inclinación respectivamente. Los tres reactores se diseñaron usando el software de diseño *Autodesk Inventor*, estos fueron hechos de características similares, aspectos como el largo del reactor; el diámetro (inicial para los cónicos), los agujeros para las termocuplas, entre otras; son similares para que se diferencien principalmente en su ángulo de inclinación y estos sean comparables entre sí.

Tabla 1: Dimensiones reactores de MPI.

Reactor	Largo [mm]	Diámetro inicial [mm]	Espesor [mm]
Cilíndrico	211	100	1
Cónico 15°	211	89	1
Cónico 30°	170	89	1

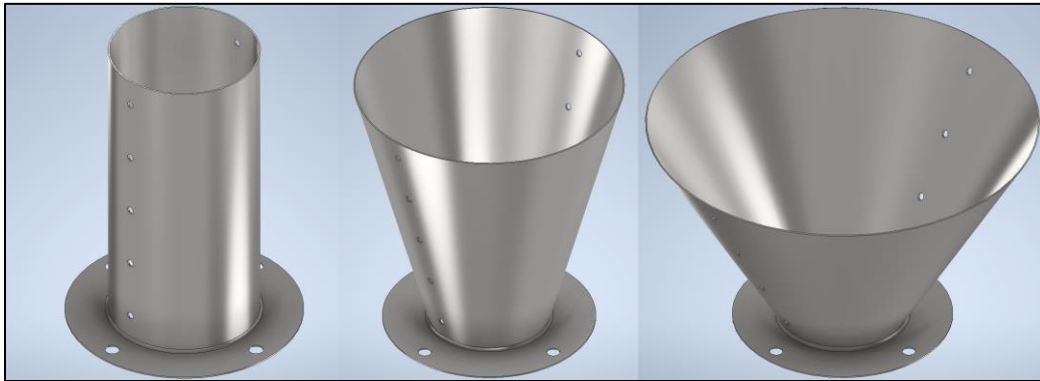


Imagen 16: Diseño 3D estructura reactores, de izq. a dcha. cilíndrico, cónico 15° y cónico 30°.

Además de las estructuras, los componentes a considerar en el diseño de los reactores son: una cámara de premezcla, lo que es un receptáculo previo al quemador que tiene el fin de homogenizar la premezcla de aire-combustible; las varillas de cerámica, que tienen el objetivo de proteger las termocuplas de la llama al interior del reactor; la trampa de llama, componente que impide la propagación de llama aguas arriba del reactor; y las esferas de alúmina, las cuales generan la matriz porosa al interior de las estructuras metálicas.

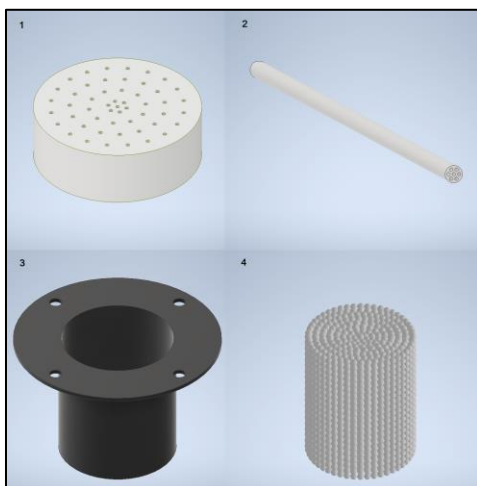


Imagen 17: Diseño 3D componentes reactores de MPI. (1) Trampa de llama, (2) varilla de cerámica, (3) cámara de premezcla, (4) esferas de alúmina.

Así, los componentes ensamblados para cada reactor se pueden apreciar a continuación en la Imagen 18.

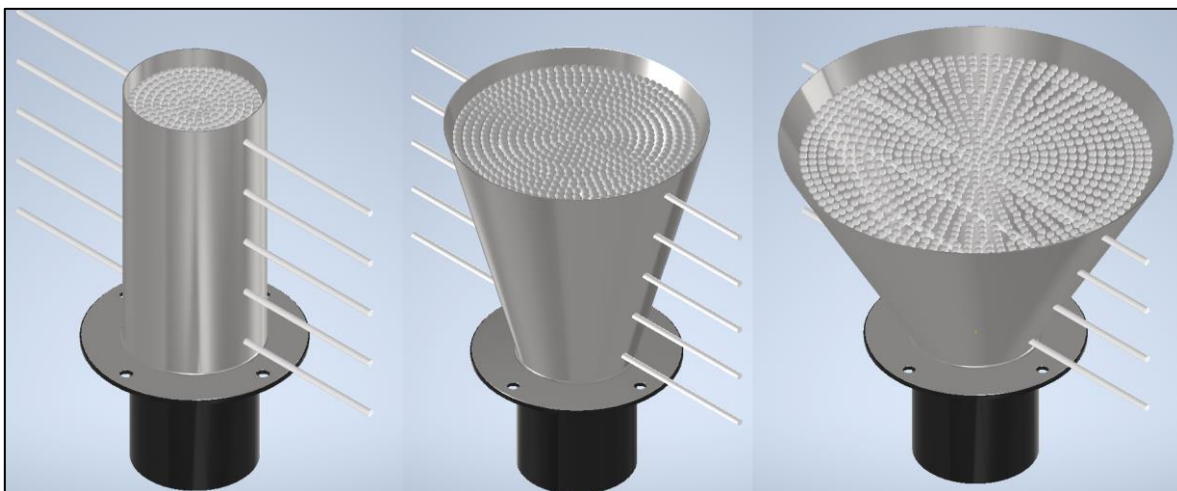


Imagen 18: Diseño 3D ensamble reactores, de izq. a dcha. cilíndrico, cónico 15° y cónico 30°.

4.3. Materiales

4.3.1. Trampa de llama

Se utiliza con el fin de evitar que las llamas viajen aguas arriba a través de las líneas de suministro de GLP-aire, este dispositivo es de un material resistente

a muy altas temperaturas y se le efectúan perforaciones que permiten la difusión de la premezcla hacia el reactor, pero que generan la extinción de la llama debido a su pequeño diámetro.

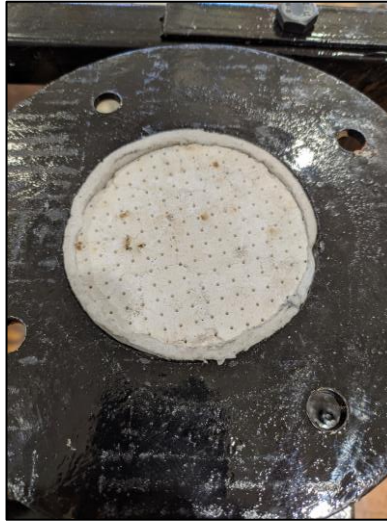


Imagen 19: Trampa de llama instalada al interior del soporte.

4.3.2. Aislante térmico

Se utiliza una fibra cerámica como aislante térmico, este material soporta temperaturas del orden de los $1200 [^{\circ}C]$ y posee un bajo coeficiente de conductividad térmica, del orden de los $0,16 [W/mK]$. Esta fibra cerámica se utiliza recubriendo la estructura metálica del reactor en su interior y exterior.



Imagen 20: Aislante térmico de fibra cerámica.

4.3.3. Esferas de alúmina

El material utilizado para generar el medio poroso en sí son esferas sólidas de alúmina de 5,6 [mm] de diámetro, esto genera un MPI con una porosidad del orden del 40% aproximadamente.



Imagen 21: Esferas de alúmina de 5,6 [mm] de diámetro de un reactor encendido.

4.3.4. Termocuplas

Se utilizan termocuplas tipo “S” para la medición de las temperaturas al interior del reactor, están hechas de dos alambres unidos, de Platino (polo negativo) y aleación de Platino con 10 % Rodio (polo positivo). La unión se genera mediante una máquina de soldadura de termocuplas, que básicamente realiza una soldadura al arco en el punto de unión de ambos alambres. Al aplicar temperatura en este bulbo de soldadura se genera una diferencia de potencial, esta señal es tomada por el adquisidor de datos que finalmente la traduce en una medición de temperatura.

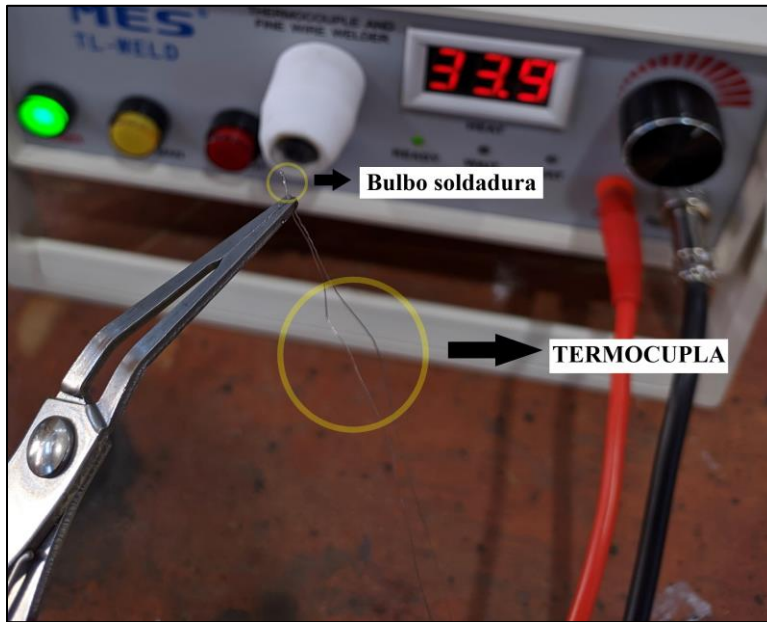


Imagen 22: Termocupa tipo “S” unida por soldadura.

4.3.5. Varillas de cerámica

Las termocupas no pueden ser expuestas directamente a la combustión, es por esto con el fin de protegerlas es que se utilizan varillas de cerámica con agujeros pasantes. Las termocupas se ubican al interior de las varillas de cerámica para luego ser dispuestas al interior del reactor.



Imagen 23: Varilla de cerámica con termocupa tipo “S”.

4.4. Equipos

4.4.1. Compresor de aire

Tabla 2: Especificaciones compresor de aire.

Marca	Nitro Compressors
Capacidad estanque	200[l]
Caudal máximo	250[l/min]



Imagen 24: Compresor de aire Nitro Compressors.

4.4.2. Filtro de aceite

Tabla 3: Especificaciones filtro de aceite.

Marca	NORGREN
Modelo	F72G- 2AN- QD3
Conexión	1/4 [in]
Presión máxima	250 [psi]
Tipo descarga	Manual

4.4.3. Trampa de Agua

Tabla 4: Especificaciones trampa de agua.

Marca	VOYLET
Modelo	AFR80
Conexión	1/2 [in]
Presión de trabajo	10 – 120 [psi]
Tipo descarga	Manual



Imagen 25: Filtro de aceite y trampa de agua montados de izq. a dcha.

4.4.4. CFM usado en aire

Tabla 5: Especificaciones controlador de flujo másico para aire.

Marca	AALBORG
Modelo	GFC57
Gas de calibración	Aire
Rango	0 – 200 [l/min]



Imagen 26: Controlador de flujo másico para línea de aire.

4.4.5. CFM usado en GLP

Tabla 6: Especificaciones controlador de flujo másico para GLP.

Marca	AALBORG
Modelo	GFC37
Gas de calibración	Aire
Rango	0 – 50 [l/min]



Imagen 27: Controlador de flujo másico para el GLP.

4.4.6. Módulo de adquisición de datos

Tabla 7: Especificaciones adquisidor de datos.

Marca	OMEGA
Modelo	OMB-DAQ-56
Alimentación	USB
Entradas	20 diferenciales / 10 individuales
Rango voltaje	31[mV] – 20[V]



Imagen 28: Módulo de adquisición de datos OMEGA.

4.4.7. Fusionadora de termocuplas

Tabla 8: Especificaciones máquina fusionadora de termocuplas.

Marca	MES
Modelo	TL-WELD
Método	Soldadura al arco
Espesor máximo soldadura	0,01 – 3 [mm]



Imagen 29: Fusionadora de Termocupla encendida.

4.5.Fase constructiva

4.5.1. Fabricación de estructura reactores

Los diseños de las estructuras de los quemadores vistos en la sección 4.2 fueron enviados a una maestranza que se encargó de su fabricación, estos fueron construidos en base a planchas de acero al carbono de 1[mm] de espesor.



Imagen 30: Estructuras fabricadas de los reactores.

4.5.2. Soporte del reactor

Se fabricó una estructura común para el ensamble de los reactores, esta fue hecha en base a un antiguo quemador de MPI existente en el Laboratorio de Energías Renovables USM. Esta estructura permite montar y desmontar los tres reactores, además de montar los soportes para las conexiones de las termocuplas.



Imagen 31: Estructura de soporte reactor.

4.5.3. Inyección de GLP-Aire

Situado en la parte inferior del soporte del reactor, existe una conexión en forma de “T” que permite la inyección del aire y combustible. El GLP ingresa de forma perpendicular al flujo del aire para permitir una fácil difusión entre estos y evitar contraflujos.



Imagen 32: Conexión para la inyección de GLP y aire.

4.5.4. Cámara de premezcla

Luego del ingreso del GLP-Aire, y previo a la trampa de llama, existe una cámara que permite una correcta premezcla entre el aire y combustible. Esto permite condiciones estables de funcionamiento del reactor, generando una mezcla acorde a la relación de equivalencia deseada.

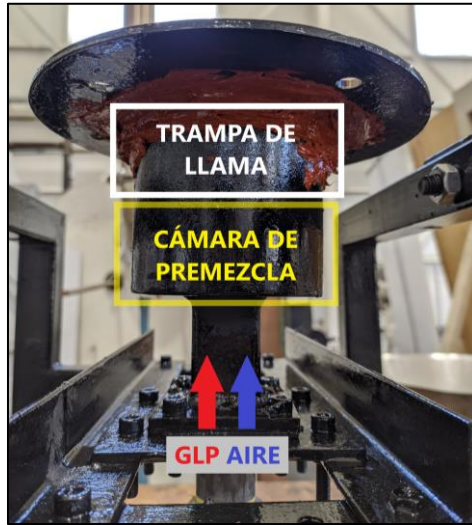


Imagen 33: Esquema de inyección de gases, cámara de premezcla y trampa de llama.

4.6. Montaje Final

Los materiales, estructuras y equipos enumerados anteriormente son dispuestos en torno a una mesa de trabajo, quedando montados finalmente como se muestra en la *Imagen 34*, de la misma forma expuesta en el diseño del apartado 4.1.



Imagen 34: Montaje final del Banco de Pruebas.

4.7. Parámetros de operación

4.7.1. Relación de equivalencia y aire-combustible

La relación de aire-combustible es la razón entre el aire real presente en una mezcla y el aire estequiométrico, este último es la proporción de aire necesario para que ocurra la oxidación completa de los combustibles sin exceso de oxidante en los productos de la combustión.

Esta relación se traduce de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{V_{A,r}}{V_{A,e}} \quad (4.1)$$

Por otro lado, la relación de equivalencia es el inverso de la relación aire-combustible. Cuando la relación de equivalencia es igual a la unidad, esta es una mezcla estequiométrica; cuando es menor a la unidad, se habla de mezclas pobres en combustible; y cuando es mayor a la unidad, se habla de mezclas ricas en combustible.

$$\phi = \frac{1}{\lambda} \quad (4.2)$$

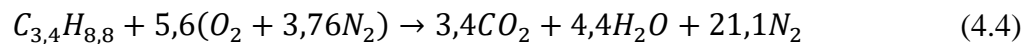
4.7.2. Velocidad de Filtración

Es la velocidad a la cual la mezcla de aire-combustible pasa a través de la matriz porosa, esta se relaciona con el caudal inyectado de premezcla, el área transversal del reactor y la porosidad de la matriz, de la siguiente forma:

$$V_{filt} = \frac{Q}{A \cdot \varepsilon} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4.3)$$

4.7.3. Estequiometría de GLP-Aire

En el GLP utilizado, la proporción de gases en volumen es 60% compuesto de Propano y 40% de Butano. Por lo que el balance químico de la combustión estequiométrica para 1 [kmol] de combustible sería el siguiente:



Luego, se procede a calcular la masa de combustible en el balance:

$$m_{GLP} = 3,4 \cdot 12,01 + 8,8 \cdot 1,007 = 49,7 [kg] \quad (4.5)$$

Además, es notable que el número de moles de O_2 en este balance es:

$$n_{O_2} = 5,6 [kmol] \quad (4.6)$$

Con lo anterior, se puede establecer una relación entre el número de moles de oxígeno por masa de combustible y el volumen de aire por masa de combustible, ambos necesarios para la combustión estequiométrica, teniendo en cuenta que la presencia de oxígeno en el aire es de un 21% en volumen y que en $1 [kmol]$ de O_2 se tiene un volumen de $22,4 [m^3]$.

Esto se traduce de la siguiente forma:

$$0,21 \cdot V_{A,e} = 22,4 \left[\frac{m^3}{kmol} \right] \cdot \frac{n_{O_2}}{m_{GLP}} \quad (4.7)$$

Reemplazando los valores y despejando $V_{A,e}$, quedaría:

$$V_{A,e} = \frac{22,4 \left[\frac{m^3}{kmol} \right] \cdot \frac{5,6 [Kmol]}{49,7 [kg]}}{0,21} \quad (4.8)$$

$$V_{A,e} = 12,02 \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad (4.9)$$

Este parámetro será usado en el cálculo de flujos para relacionar los caudales de GLP y aire, en función de la relación de equivalencia y velocidad de filtración.

4.7.4. Cálculo de Flujos

Para este cálculo, se establece que como parámetros de entrada se definirá una velocidad de filtración a la entrada del reactor y la relación de equivalencia, estos parámetros determinarán los flujos de GLP y aire a utilizar.

Por lo tanto, se establece la relación entre los flujos:

$$Q = \dot{V}_{glp} + \dot{V}_A \left[\frac{l}{min} \right] \quad (4.10)$$

$$\dot{V}_A = \frac{\dot{V}_{glp} \cdot \rho_{glp} \cdot V_{A,e}}{\emptyset} \left[\frac{l}{min} \right] \quad (4.11)$$

Reemplazando (4.11) en (4.10) :

$$Q = \dot{V}_{glp} + \frac{\dot{V}_{glp} \cdot \rho_{glp} \cdot V_{A,e}}{\emptyset} \left[\frac{l}{min} \right] \quad (4.12)$$

Por otro lado, si es que el caudal lo expresamos en función de la velocidad de filtración y el área a la entrada del reactor, se tiene:

$$Q = V_{filt,o} \cdot A_o \left[\frac{l}{min} \right] \quad (4.13)$$

Finalmente, despejando el flujo de GLP y reemplazando (4.13) en (4.12), quedaría:

$$\dot{V}_{glp} = \frac{V_{filt,o} \cdot A_o}{1 + \frac{\rho_{glp} \cdot V_{A,e}}{\emptyset}} \left[\frac{l}{min} \right] \quad (4.14)$$

4.7.5. Potencia térmica

La potencia térmica está determinada por el poder calorífico inferior del combustible; el cual representa la energía liberada de la combustión, sin contar la parte que corresponde al calor latente del vapor de agua generado, ya que no se produce cambio de fase en forma de condensación; y por el flujo volumétrico de combustible, es decir la tasa de ingreso de volumen de combustible en el tiempo, además de la densidad del combustible y un factor de conversión de unidades.

Por lo tanto, esta estaría dada por:

$$P = \frac{\dot{V}_{glp} \cdot \rho_{glp} \cdot LHV_{glp}}{60000} [kW] \quad (4.15)$$

4.8. Protocolo de Seguridad, Encendido y Apagado del Banco de Pruebas.

Con el objetivo de realizar los procedimientos experimentales con estándares de seguridad, es que se desarrolló un protocolo con las secciones que se describen a continuación.

4.8.1. Seguridad

- Utilizar vestimenta adecuada y elementos de protección personal (overol o delantal, pantalón largo, zapatos cerrados, guantes y lentes de seguridad).
- Comprobar que las líneas de gas (o combustible) estén separados de las conexiones eléctricas.
- Comprobar el funcionamiento del compresor y realizar purga de humedad previamente al encendido.
- Estar siempre alerta durante el funcionamiento del reactor, verificando los flujos de premezcla y cualquier evento que difiera del normal comportamiento de este.
- Nunca dejar el reactor encendido sin alguien a cargo.
- Procurar que el espacio de trabajo posea buena ventilación.
- No mover el reactor ni las líneas de alimentación de premezcla aire-gas cuando esté encendido.
- Antes de encender el reactor, procurar esperar unos segundos luego de establecer los flujos de premezcla, ya que la electroválvula de los controladores permite pasar el máximo de flujo antes de ajustarse, esto puede generar una acumulación excesiva de gas en el reactor, esperar mucho tiempo también, por lo que la espera debe ser breve.

4.8.2. Encendido

- Encender controladores de flujo másico de las líneas de alimentación de aire y gas (no abrir llaves de paso aún), esperar 15 minutos para estabilizar los equipos antes de encender el reactor.
- Encender el compresor para que comience a llenar el estanque de aire.
- Comprobar que no existan fugas en las líneas de alimentación de aire y gas, utilizando una mezcla de agua jabonosa que genere burbujas y abriendo las llaves de paso momentáneamente.
- Conectar computador al módulo de adquisición de datos para la toma de temperaturas. (En caso de ser la primera vez, leer manual del módulo para configurar, no obstante, como mínimo se debería: seleccionar termocupla tipo S, activar los canales análogos utilizados de toma de datos, establecer la frecuencia de escaneo deseada y definir el formato y destino de entrega final de datos). Luego, iniciar la toma de datos al momento de encender el reactor.
- Abrir la llave de paso de aire, esperar a que se estabilice el controlador de flujo másico, luego establecer el flujo deseado utilizando un destornillador en el

costado del controlador para abrir o cerrar la electroválvula. Una vez hecho esto, repetir los mismos pasos para el gas. Hecho esto, y con el flujo de premezcla estable, encender el reactor manualmente en la superficie superior.

4.8.3. Apagado

- Cerrar llave de paso del gas y aire.
- Apagar compresor y controladores de flujo másico.
- Esperar a que el reactor se enfríe, no mover ni tocar mientras tanto.
- Terminar la adquisición de datos en el programa del computador y desconectar el módulo.

4.9. Pruebas experimentales

4.9.1. Reactor cilíndrico

Se realizaron pruebas en el reactor cilíndrico para familiarizarse y entender de forma experimental la combustión en medios porosos inertes, además de tener una línea base para los reactores cónicos.

Para las pruebas del reactor cilíndrico, se estableció una velocidad de filtración de $0,35 [m/s]$ y un rango de la relación de equivalencia de $0,3$ a 1 , con lo cual se determinaron los flujos de aire y combustible.

Tabla 9: Parámetros de pruebas en reactor cilíndrico para distintas relaciones de equivalencia.

Potencia [kW]	\emptyset	$V_{glp} [l/min]$	$V_{aire} [l/min]$
2,26	1	1,40	35,70
1,84	0,80	1,14	35,97
1,62	0,70	1,00	36,11
1,16	0,50	0,72	36,39
0,93	0,40	0,58	36,53
0,70	0,30	0,43	36,68



Imagen 35: Reactor cilíndrico encendido.

4.9.2. Reactor cónico de 15°

Luego de realizar las pruebas en el reactor cilíndrico, se realizaron las pruebas en el reactor cónico de 15°. Al intentar encender el reactor con la misma V_{filt} que se utilizó para el reactor cilíndrico se hizo notar que no era suficiente para poder encender de forma estable, por lo que se realizaron pruebas escalonadas hasta llegar a una V_{filt} estable. Se determinó una V_{filt} de 0,63 [m/s], al realizar las pruebas se ajustaron en un rango de relaciones de equivalencia de 0,35 a 1, dónde se pudo determinar un rango de estabilización del frente de combustión e identificar las velocidades de éste viajando aguas arriba y aguas abajo.

Tabla 10: Parámetros de pruebas en reactor cónico de 15° para distintas relaciones de equivalencia.

Potencia [kW]	Ø	V_{glp} [l/min]	V_{aire} [l/min]
4,13	1,00	2,55	64,57
3,33	0,80	2,06	65,06
2,92	0,70	1,81	65,31
2,51	0,60	1,55	65,56
2,10	0,50	1,30	65,82
1,69	0,40	1,04	66,07
1,48	0,35	0,92	66,20
1,27	0,30	0,79	66,33



Imagen 36: Reactor cónico de 15° en pruebas y adquisición de datos.

4.9.3. Reactor cónico de 30°

En el caso del reactor cónico de 30° también se aumentó la V_{filt} debido a que el reactor no se encendía de forma estable con las velocidades utilizadas en las pruebas anteriores. Se estableció una V_{filt} de 0,9 [m/s] y se realizaron las pruebas en un rango de relaciones de equivalencia de 0,4 a 1. De esta forma, se determinó su rango de estabilización y velocidades del frente de combustión, además en este reactor se hicieron pruebas estudiando la diferencia radial de la temperatura.

Tabla 11: Parámetros de pruebas en reactor cónico de 30° para distintas relaciones de equivalencia.

Potencia [kW]	Ø	V_{glp} [l/min]	V_{aire} [l/min]
5,86	1,00	3,62	91,75
4,73	0,80	2,92	92,46
4,15	0,70	2,57	92,81
3,57	0,60	2,21	93,17
2,99	0,50	1,85	93,53
1,00	0,40	1,48	93,89

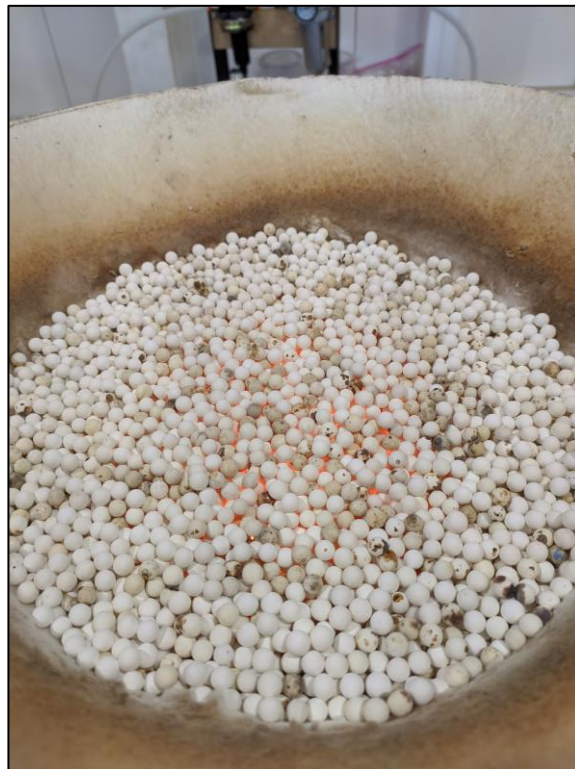


Imagen 37: Vista superior de reactor cónico de 30° en combustión.

5. Presentación y análisis de resultados

5.1.Reactor cilíndrico

5.1.1. Perfiles térmicos para distintas relaciones de equivalencia

En los siguientes gráficos se puede apreciar las temperaturas en el tiempo para las distintas termocuplas a lo largo del reactor, en ese sentido es fácil identificar cómo un frente de combustión viaja a través de la matriz porosa; en términos simples, cuando el reactor se enciende y el FC viaja aguas arriba, se ve un aumento gradual de la temperatura de la termocupla posicionada en la parte más alta del reactor (T5) hasta que esa temperatura llega a su máximo y permanece constante, luego comienza a subir gradualmente la temperatura de la termocupla siguiente (T4), la cual tiene el mismo comportamiento que la anterior, y así sucesivamente hasta la termocupla de la región inferior del reactor (T1), esto muestra como el frente de combustión va viajando a través de la matriz, generando estos aumentos de temperatura gradual gracias a la recirculación del calor y temperaturas máximas de carácter superadiabático.

De la misma forma, cuando tenemos que el frente de combustión está posicionado en la zona inferior del reactor y luego viaja aguas abajo, se puede notar una disminución gradual de la temperatura a medida que va viajando el FC y se va alejando de la termocupla, y una temperatura máxima en el instante en que está viajando a la altura de la termocupla.

• $\varnothing=1$

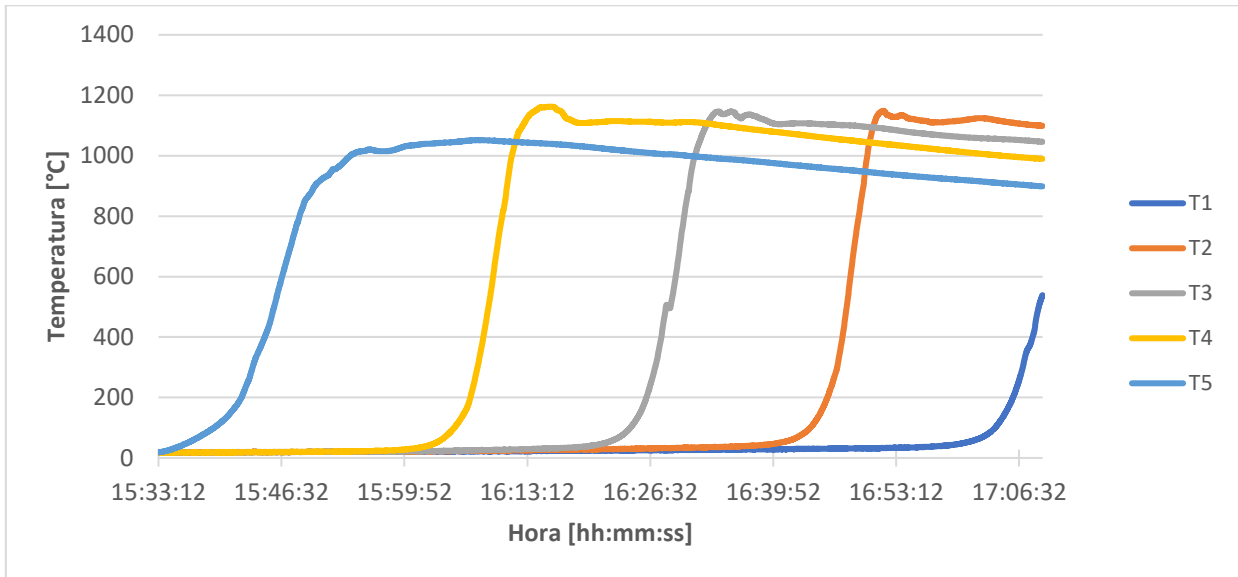


Gráfico 1: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\varnothing=1$ y el frente de combustión viajando aguas arriba.

• $\varnothing=0,95$

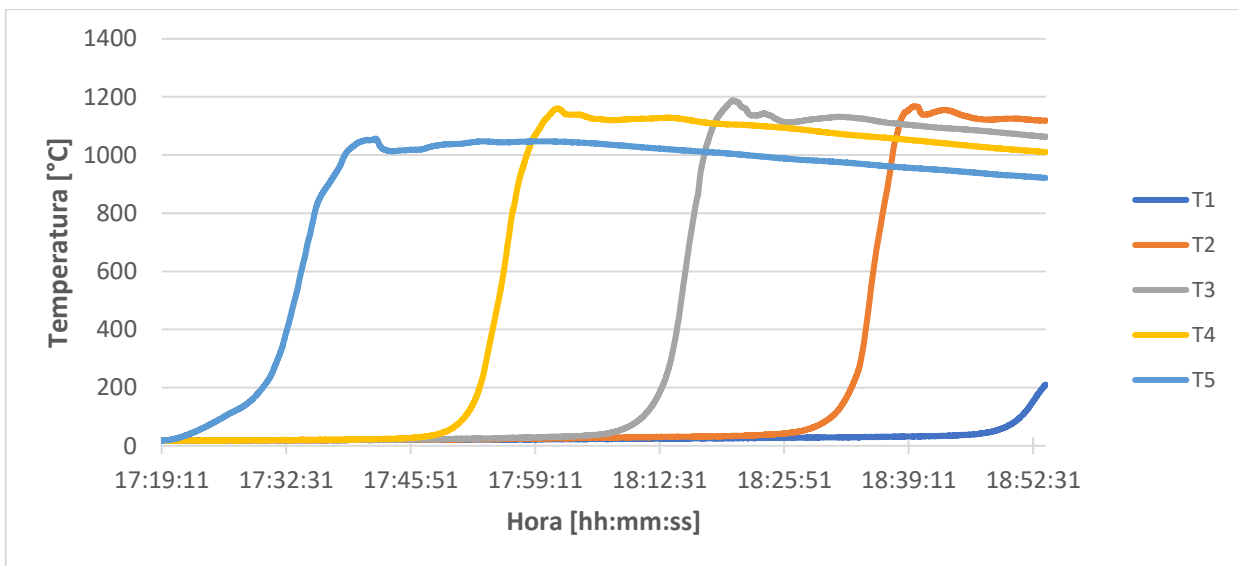


Gráfico 2: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\varnothing=0,95$ y el frente de combustión viajando aguas arriba.

- $\varnothing=0,8$

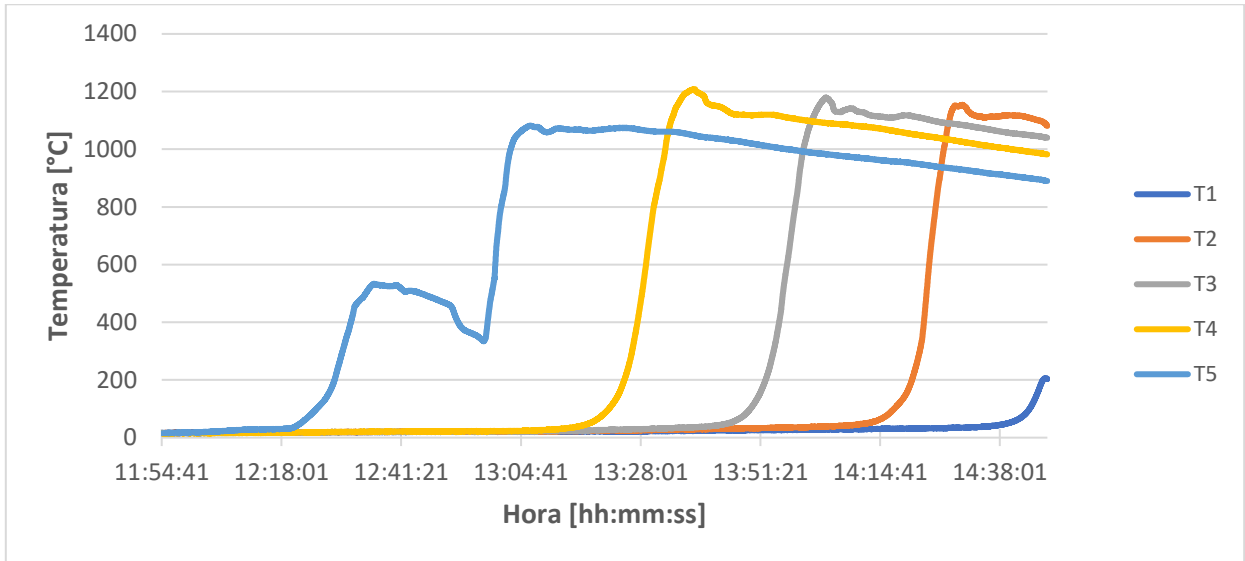


Gráfico 3: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\varnothing=0,8$ y el frente de combustión viajando aguas arriba.

- $\varnothing=0,7$

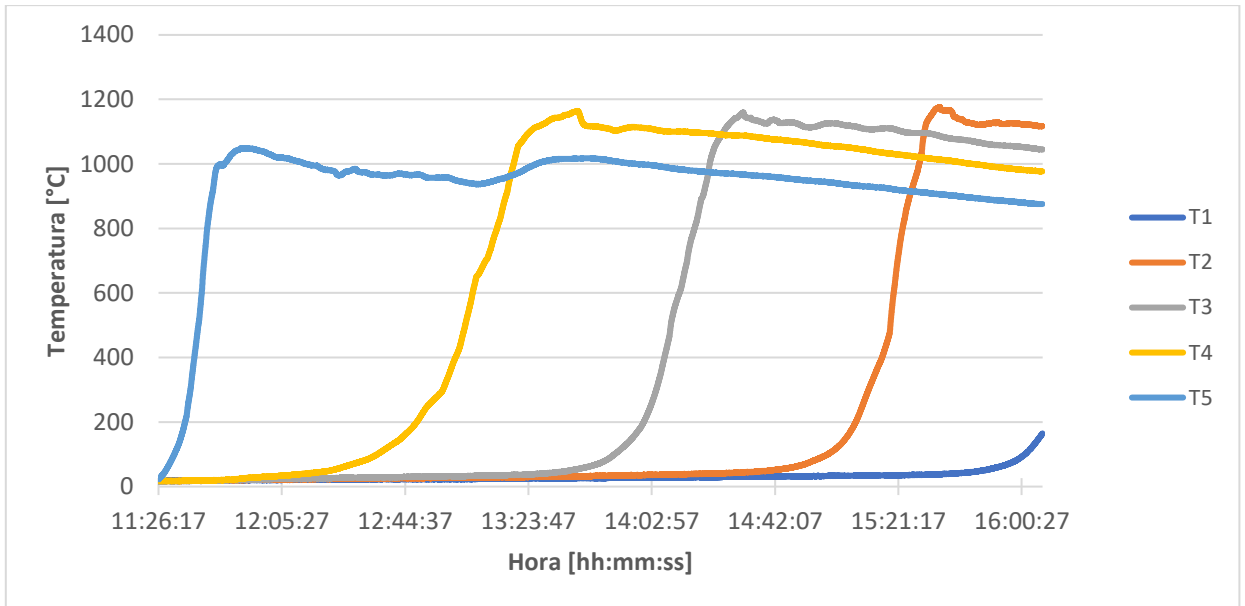


Gráfico 4: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\varnothing=0,7$ y el frente de combustión viajando aguas arriba.

• $\varnothing=0,5$

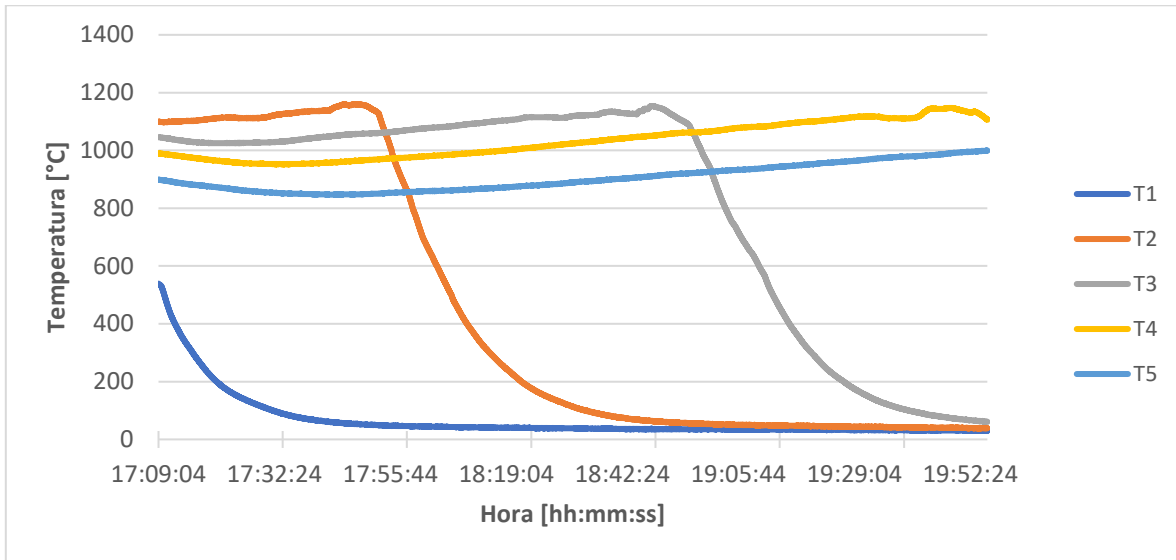


Gráfico 5: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\varnothing=0,5$; el frente de combustión viajando aguas abajo y luego estabilizado entre termocuplas T4 y T5.

• $\varnothing=0,4$

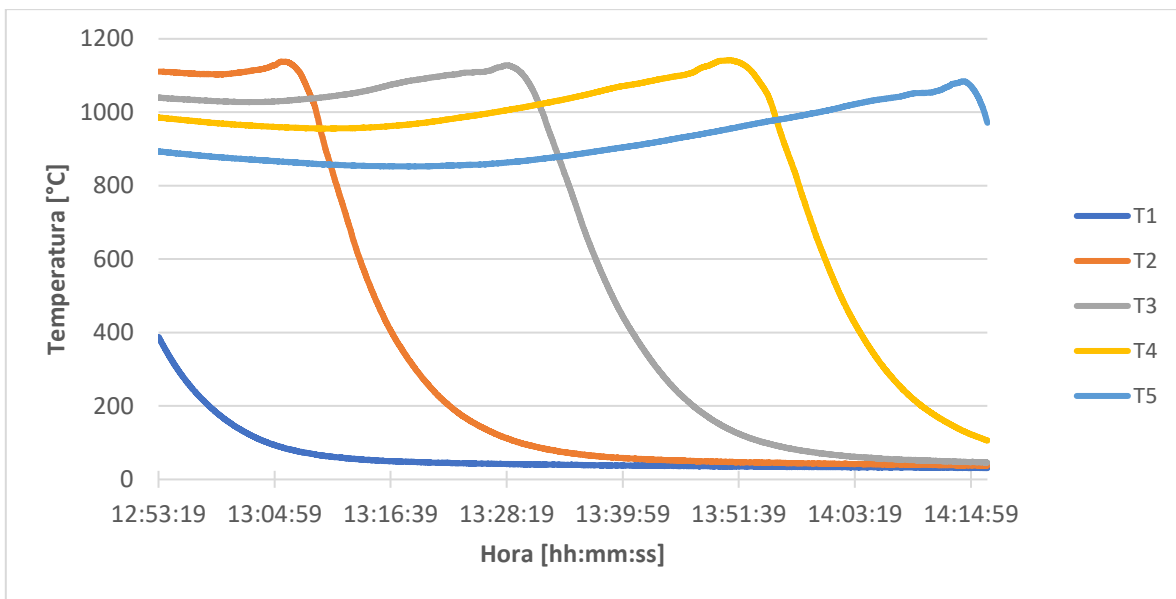


Gráfico 6: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\varnothing=0,4$ y el frente de combustión viajando aguas abajo.

• $\emptyset=0,3$

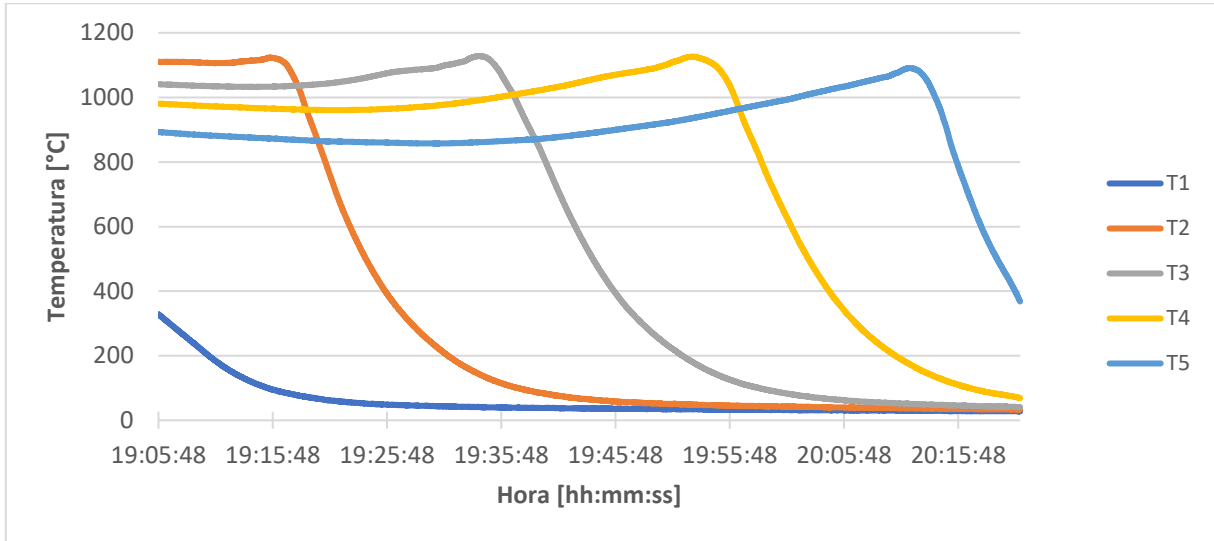


Gráfico 7: Temperaturas en reactor cilíndrico en el tiempo, con un $\emptyset=0,3$ y el frente de combustión viajando aguas abajo

5.1.2. Velocidades del frente de combustión.

En el reactor cilíndrico las velocidades del frente de combustión son constantes para una misma relación de equivalencia, en el siguiente gráfico se pueden apreciar la variación de la velocidad del FC para todas las relaciones de equivalencia probadas, notando que para $\emptyset=0,5$ la velocidad es cero, el cuál es el punto de estabilización de la combustión.

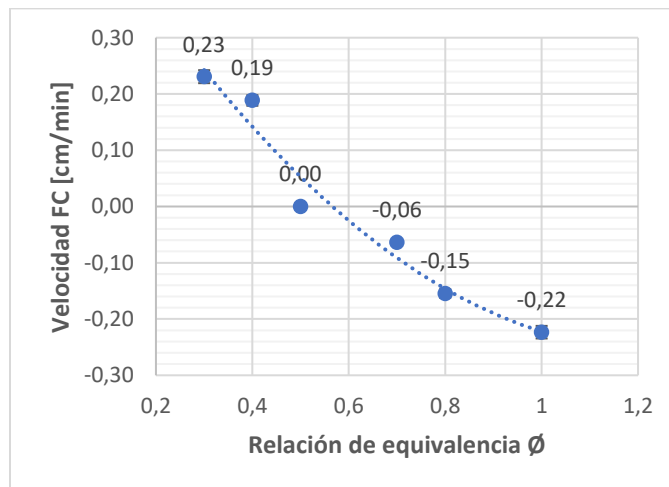


Gráfico 8: Velocidad del frente de combustión en función de la relación de equivalencia en reactor cilíndrico.

5.1.3. Estabilización de la combustión

Como se vio anteriormente, cuando se tiene la relación de equivalencia $\phi=0,5$ en el reactor cilíndrico se genera la estabilización del frente de combustión dentro de la matriz porosa, ubicada en la región entre las termocupas T4 y T5.

En este régimen estacionario, se pueden apreciar claramente las dos regiones de estabilización: la primera región aguas arriba, como una zona de precalentamiento de la premezcla aire-combustible por la intensificación de los mecanismos de transferencia de calor; y la región aguas abajo, donde está ocurriendo la combustión y se generan temperaturas superadiabáticas con un equilibrio térmico entre la matriz porosa y el gas.

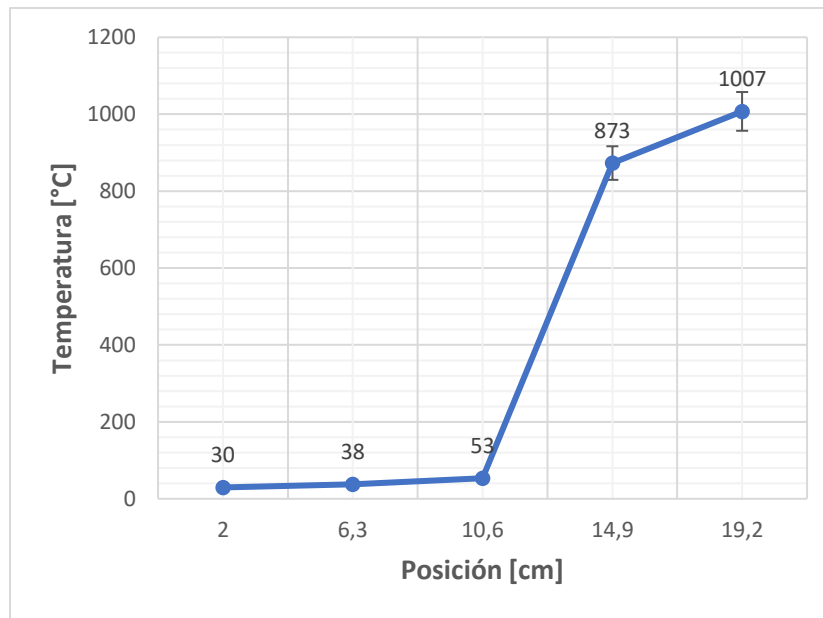


Gráfico 9: Temperaturas a lo largo del reactor cilíndrico con el frente de combustión estabilizado.

5.2.Reactor Cónico 15°

5.2.1. Frente de combustión viajando aguas arriba con $V_{fit}= 0,63$ [m/s].

Respecto de las velocidades del frente de combustión, se puede notar un aumento en la magnitud de la velocidad del FC viajando aguas arriba, este comportamiento se explica debido a la geometría cónica, la cual actúa como una tobera para el FC.

También es relevante notar que existe una disminución de la magnitud de la velocidad cuando se disminuye la relación de equivalencia viajando aguas arriba, esto nos muestra la tendencia de la velocidad a ser cero cuando nos acercamos al rango de estabilización del frente de combustión que se verá más adelante.

- $\varnothing=1$

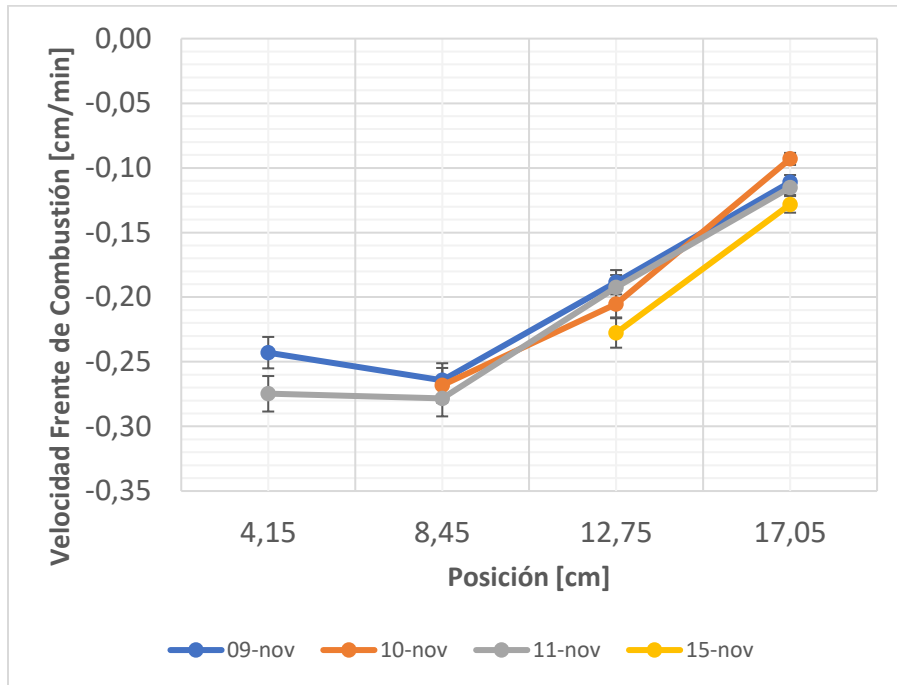


Gráfico 10: Velocidades del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 15° con $\varnothing=1$ para diferentes pruebas.

- $\emptyset=1$ y $\emptyset=0,8$

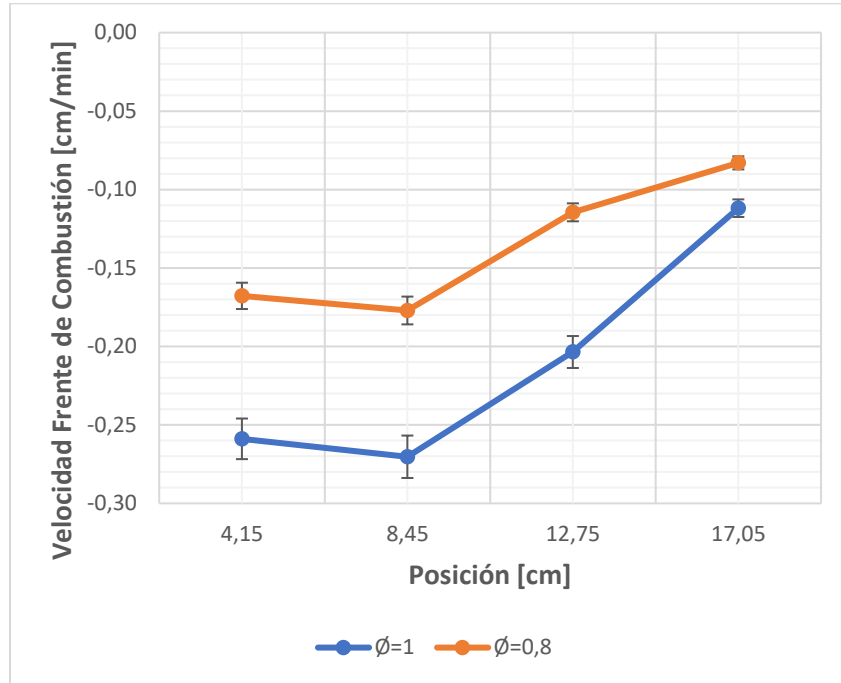


Gráfico 11: Velocidades del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 15° para diferentes \emptyset .

5.2.2. Frente de Combustión viajando aguas abajo con $V_{fit}= 0,63$ [m/s].

Por otro lado, cuando el FC viaja aguas abajo se nota una disminución de la magnitud de la velocidad, en este caso también se explica debido a la geometría cónica por actuar como un difusor. Además, se tiene una disminución de esta magnitud cuando se aumenta la relación de equivalencia, esto igualmente demuestra la tendencia de la velocidad a ser cero cuando nos acercamos al rango de estabilización.

- $\varnothing=0,3$ y $\varnothing=0,35$

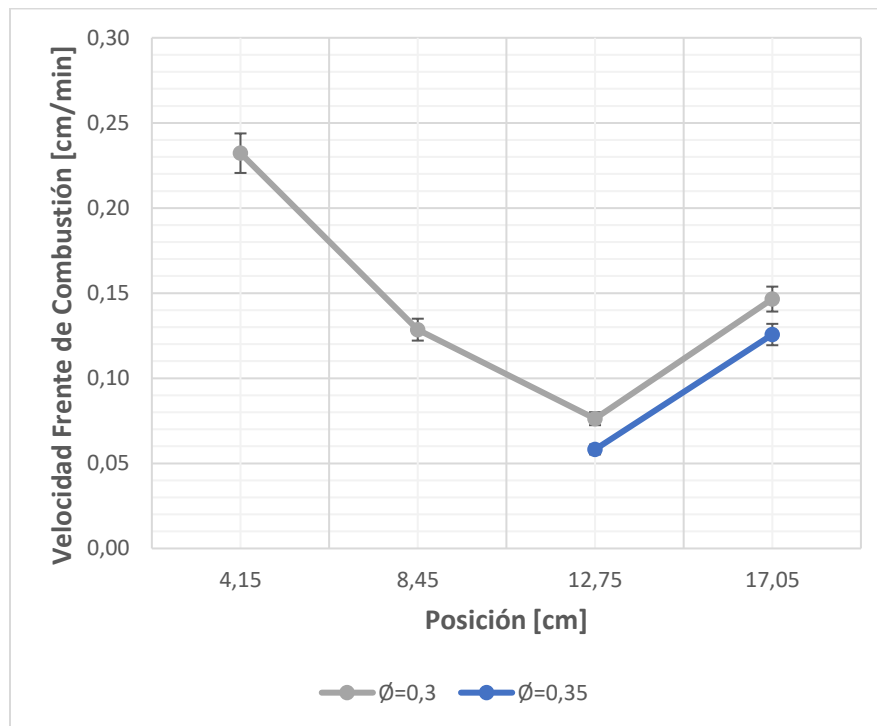


Gráfico 12: Velocidades del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 15° para diferentes \varnothing .

5.2.3. Frente de Combustión estabilizado con $V_{\text{filt}}= 0,63$ [m/s].

Para este reactor se determinó un rango de estabilización del frente de combustión para las relaciones de equivalencia entre $\varnothing = 0,4 - 0,6$.

Se puede notar que la región de estabilización varía según la relación de equivalencia, para mezclas más pobres el frente de combustión tiende situarse en la región superior del reactor y en el caso contrario, cuando tenemos mezclas más ricas el FC se sitúa en la región inferior. Esto se puede explicar gracias a la velocidad de deflagración laminar y la velocidad de filtración, ya que la velocidad de deflagración laminar es directamente proporcional en magnitud a la relación de equivalencia, por otro lado, la velocidad de filtración va disminuyendo a lo largo del reactor por el efecto de la geometría divergente, es esto lo que permite que exista un rango de estabilización y no solamente una relación de equivalencia en particular.

Por otra parte, se puede apreciar una temperatura máxima de 1247 [°C] en estabilización para $\varnothing = 0,6$, que disminuye según la relación de equivalencia para mezclas más pobres. Esta

temperatura superadiabática se logra gracias a la recirculación del calor generada por la intensificación de los mecanismos de transferencia de calor que vimos en la sección 3.1.5.

- $\varnothing=0,4$; $\varnothing=0,5$ y $\varnothing=0,6$

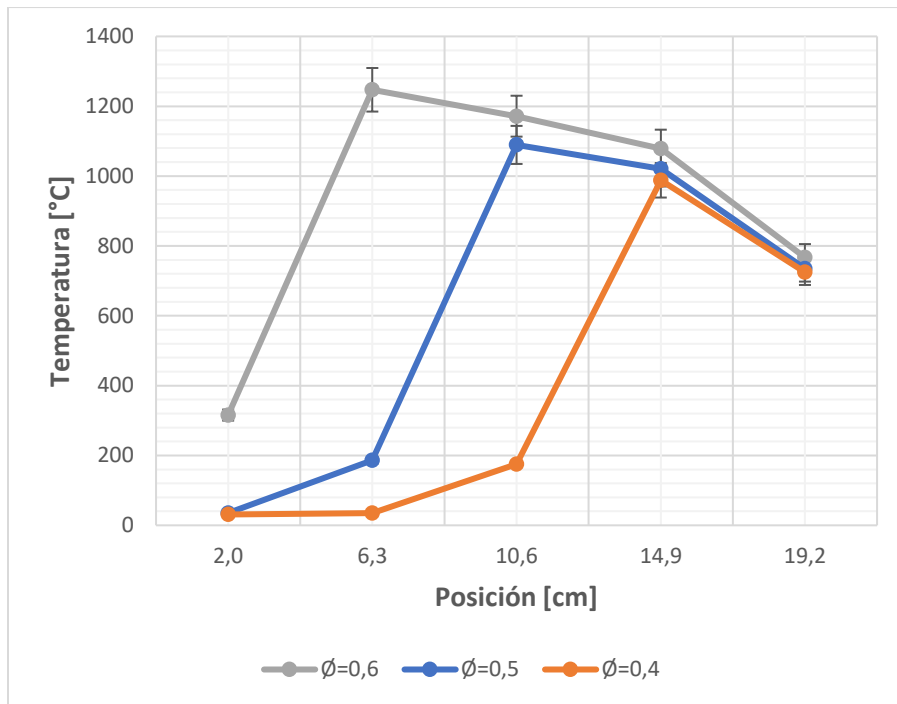


Gráfico 13: Temperatura a lo largo del reactor cónico de 15° con el Frente de Combustión estabilizado para diferentes \varnothing .

5.2.4. Frente de Combustión viajando aguas arriba con diferentes V_{fit} .

Al probar diferentes velocidades de filtración en la misma relación de equivalencia, se puede notar un comportamiento de la velocidad bastante similar dado que la variación entre ambas no es significativa.

- $\varnothing=1$

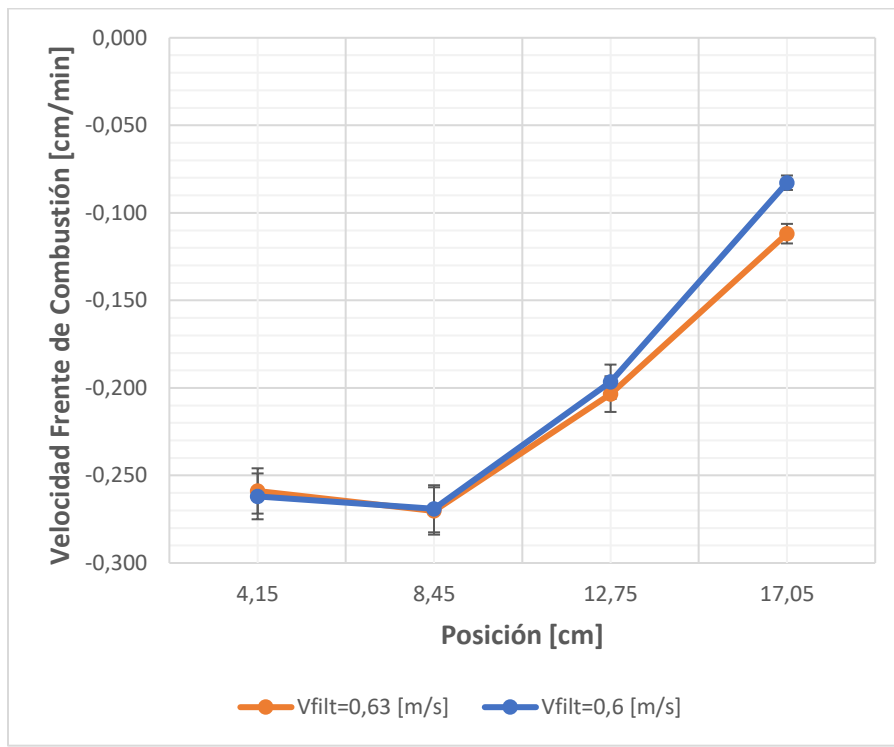


Gráfico 14: Velocidad del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 15° con $\varnothing=1$ para diferentes V_{filt} .

5.2.5. Frente de Combustión estabilizado con diferentes V_{filt} .

Al contrario del punto anterior, en el frente de combustión estabilizado con la misma relación de equivalencia y diferente velocidad de filtración, se puede apreciar un desplazamiento de la región donde se sitúa el frente de combustión, notando que para la V_{filt} menor el FC se sitúa aguas arriba respecto de la V_{filt} mayor.

- $\varnothing=0,5$

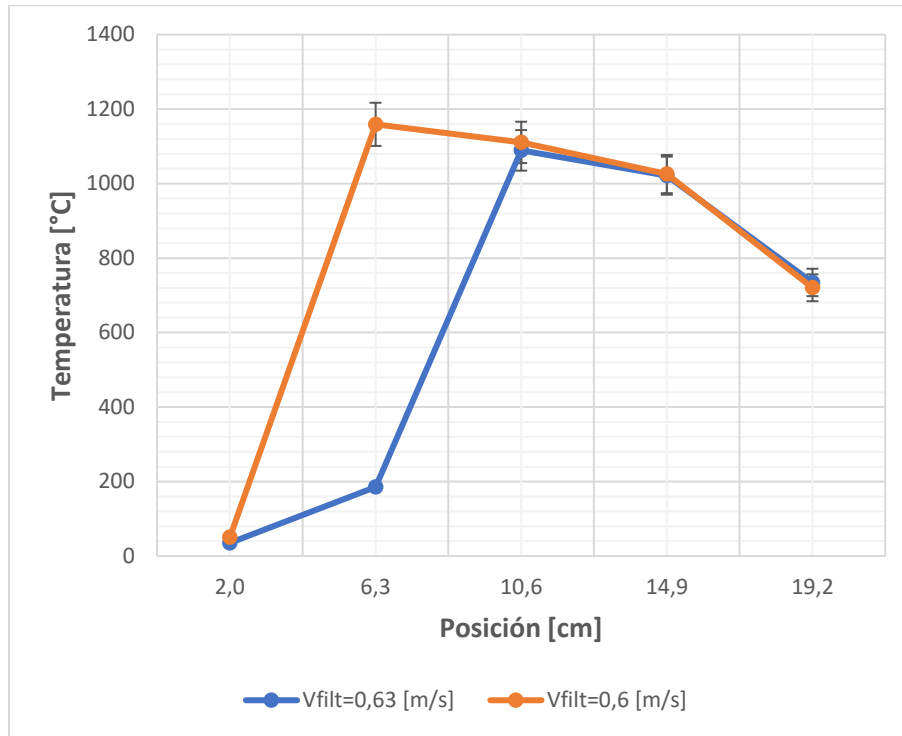


Gráfico 15: Temperatura a lo largo del reactor cónico de 15° con el frente de Combustión estabilizado para diferentes Vfilt.

5.3. Reactor Cónico 30°

5.3.1. Frente de Combustión viajando aguas arriba.

De la misma manera que en el reactor cónico de 15°, se aprecia un aumento de la magnitud de la velocidad del FC, actuando la geometría cónica como una tobera. Por otro lado, vemos que las velocidades son bastante similares al reactor de 15°, notando un leve aumento en la magnitud de la velocidad para el reactor de 30°.

- $\varnothing=1$

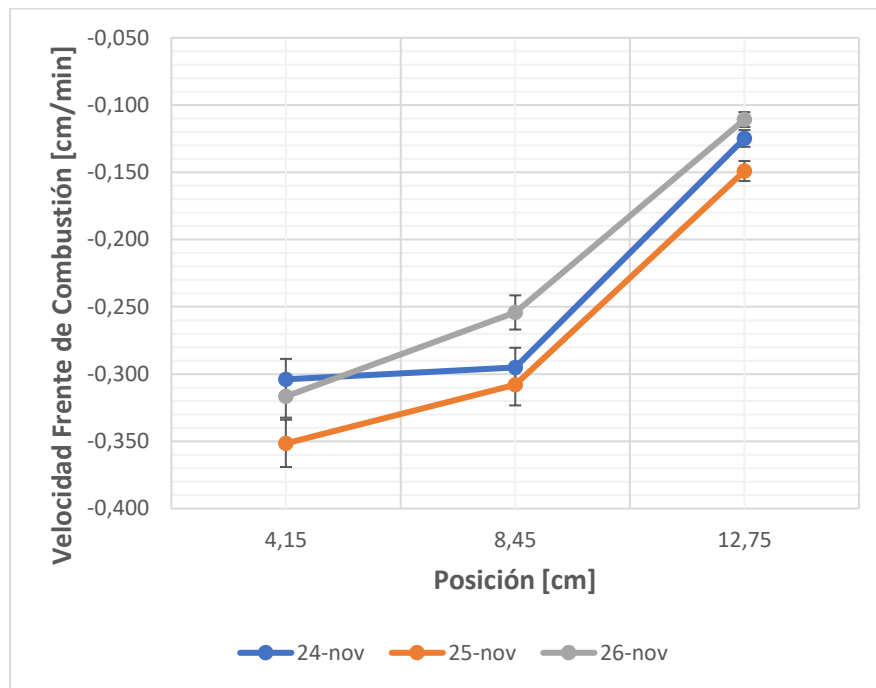


Gráfico 16: Velocidades del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 30° con $\varnothing=1$ para diferentes pruebas.

5.3.2. Frente de Combustión viajando aguas abajo.

En este caso, también tenemos el comportamiento similar al reactor de 15° en cuanto a la disminución de la magnitud de la velocidad viajando aguas abajo, debido al efecto difusor de la geometría cónica del reactor. Las velocidades del frente de combustión tienden a ser menores, no obstante, cabe señalar que para esta relación de equivalencia en el reactor de 15° se genera un caso del FC estabilizado.

- $\varnothing=0,4$

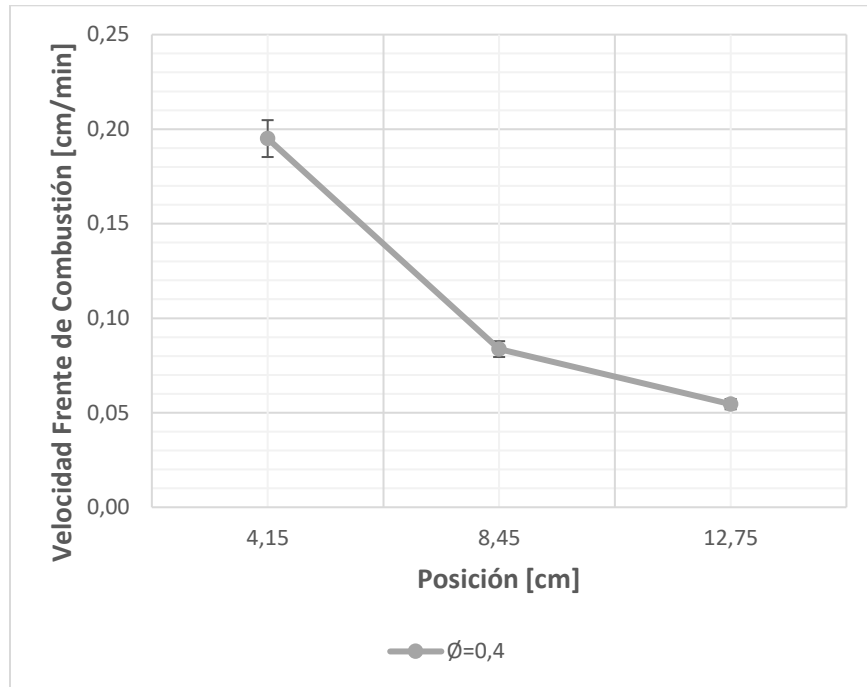


Gráfico 17: Velocidad del frente de Combustión a lo largo del reactor cónico de 30° con $\varnothing=0,4$.

5.3.2.1. Frente de Combustión estabilizado.

Para este reactor se determinó un rango de estabilización del frente de combustión para las relaciones de equivalencia entre $\varnothing = 0,5 - 0,6$.

- $\varnothing=0,5$ y $\varnothing=0,6$

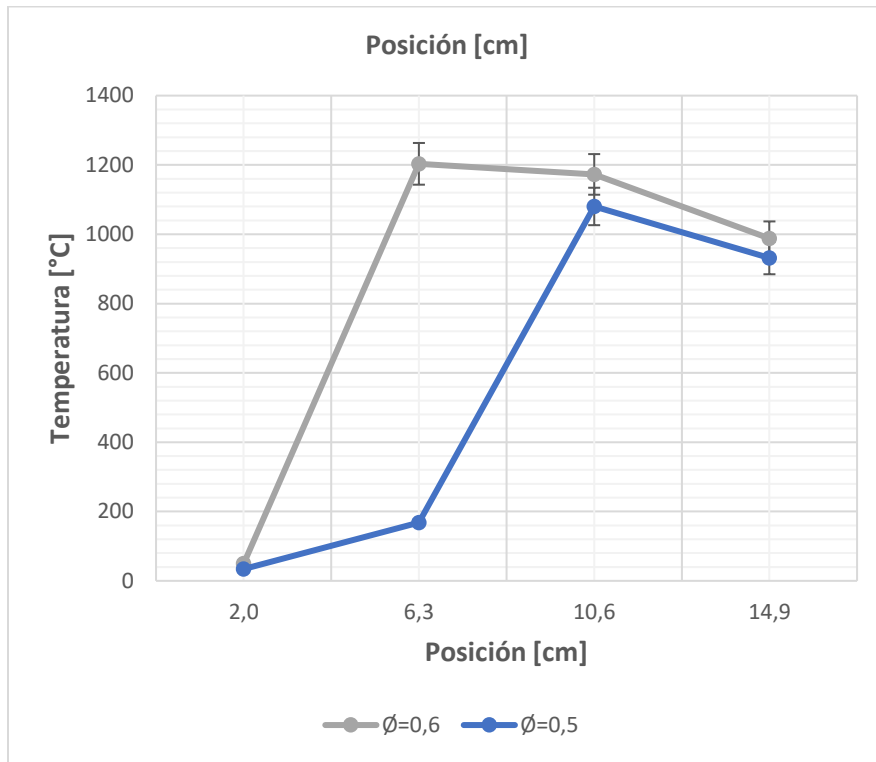


Gráfico 18: Temperatura a lo largo del reactor cónico de 30° con el Frente de Combustión estabilizado para diferentes \varnothing .

5.3.3. Variación Radial de la temperatura.

Para las pruebas de variación radial de la temperatura en el reactor, se posicionó la termocupla T2 en el centro del reactor ($R=0$) y la termocupla T5 en el punto intermedio entre el centro y el extremo del reactor $R=(R_{\max}/2)$.

Para el caso del frente de combustión viajando aguas arriba, se pueden distinguir tres fases de la variación radial de la temperatura, en primera fase un aumento de la diferencia de temperaturas a lo largo del radio, en segunda fase una homogenización de las temperaturas y en tercera fase una disminución de la diferencia de temperaturas a lo largo del radio.

- $\emptyset=1$

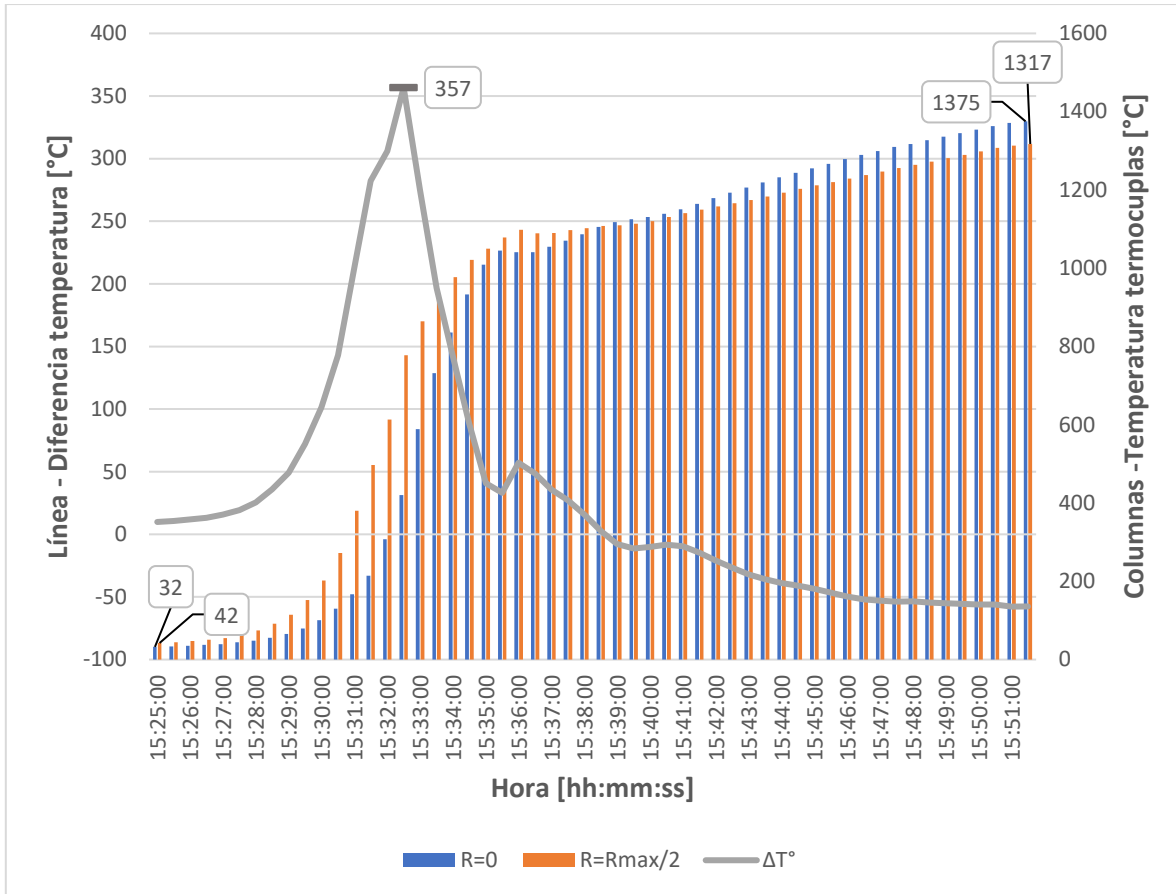


Gráfico 19: Temperatura de las termocupas n°2 y n°5, y su diferencia de temperatura en el tiempo en el reactor cónico de 30°.

Para el caso del frente de combustión viajando aguas abajo, ocurre justamente lo contrario, una primera fase disminución de la diferencia de temperaturas a lo largo del radio, en segunda fase una homogenización de las temperaturas y en tercera fase un aumento de la diferencia de temperaturas a lo largo del radio.

• $\varnothing=0,4$

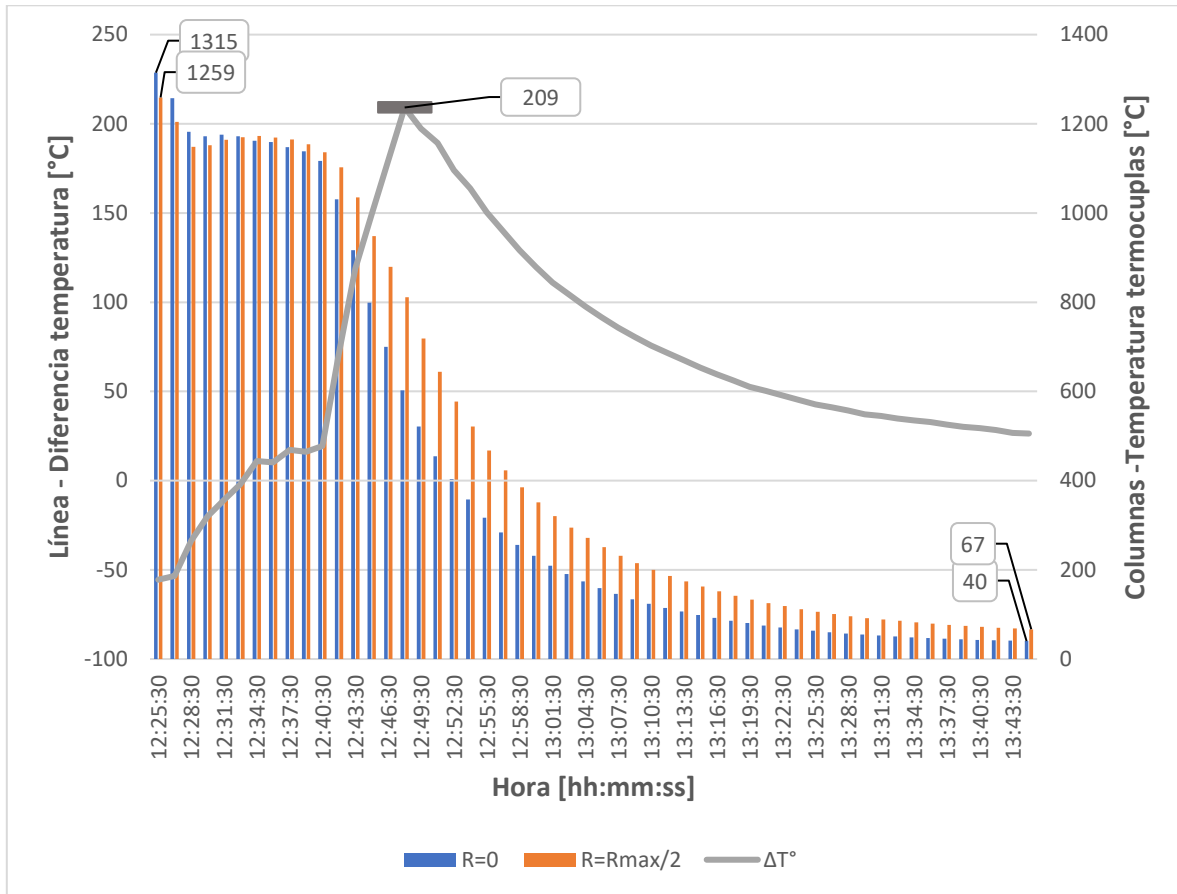


Gráfico 20: Temperatura de las termocuplas n°2 y n°5, y su diferencia de temperatura en el tiempo en el reactor cónico de 30°.

6. Conclusiones

Los reactores de medios porosos inertes son una tecnología innovadora, vigente y que se plantea resolver los desafíos de la transición energética. Es claro que aún es una tecnología que está en desarrollo, y por lo mismo también en constante estudio e investigación en el mundo de la academia.

En esta investigación se ha comprobado que esta tecnología es capaz de desarrollarse experimentalmente, generando dos reactores de 15° y 30° de inclinación respectivamente, estableciendo parámetros de velocidades de filtración de premezcla, potencia, flujos de aire y combustible, relación de equivalencia y registrando la temperatura interna de los reactores a lo largo de su matriz porosa, y radialmente en el caso del reactor de 30°.

Para ambos reactores fue posible determinar un rango de estabilización de la combustión según la variación de la relación de equivalencia en mezclas pobres, en una velocidad de filtración determinada. Para el reactor de 15° de inclinación, bajo una V_{filt} de 0,63 [m/s], se estableció un rango de estabilización según un \emptyset de 0,4 a 0,6; y para el reactor de 30° de inclinación, bajo una V_{filt} de 0,9 [m/s], se estableció un rango de estabilización según un \emptyset de 0,5 a 0,6.

Se nota la diferencia entre los ángulos de divergencia, su efecto en la velocidad de filtración y por ende en el frente de combustión. En ese sentido, se hace relevante la necesidad de probar con potencias mayores que permitan probar de mejor forma los rangos de relaciones de equivalencia, y que no se vean limitados por los rangos de flujos de premezcla aire-combustible. De lo anterior se puede desprender una mejora de diseño para el banco de pruebas, lo que sería utilizar un compresor de mayor capacidad o un soplador, dado que a medida que se aumentó el ángulo de divergencia, el reactor necesitó un mayor flujo de aire-combustible para mantener la combustión sumergida e inclusive para mantenerse encendido, esto se vio limitado por el flujo de aire que era capaz de suministrar el compresor utilizado. Por otro lado, también se recomienda agregar al banco de pruebas un sistema de medición de gases de combustión, para así lograr determinar la eficiencia de la combustión y el resultado que tiene este tipo tecnología en disminuir las emisiones de CO y NOx.

Respecto a la diferencia radial de la temperatura, se puede notar que cuando el frente de combustión viaja aguas arriba, la mayor concentración de calor está alejada radialmente del

centro del reactor; de la misma manera cuando el frente de combustión viaja aguas abajo, ocurre exactamente lo contrario, la concentración de calor ocurre en el centro del reactor.

Para finalizar, de esta investigación experimental se puede desprender que es posible desarrollar una aplicación real de reactores de medios porosos inertes de geometría cónica que tengan como finalidad generar una transferencia de calor más eficiente y con un rango de potencias estable.

7. Bibliografía

- [1] U.S. Energy Information Administration, "International Energy Outlook," 2019.
- [2] MINISTERIO DE ENERGÍA, LEY N°21305 SOBRE EFICIENCIA ENERGÉTICA, 2021.
- [3] M. Mujeebu, M. Abdullah, M. Bakar, A. Mohamad, R. Muhad and M. Abdullah, "Combustion in porous media and its applications - A comprehensive survey.," *Journal Environmental Management*, no. 90:2287–312, 2009.
- [4] C. A. E, «., ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA COMBUSTIÓN DE MEZCLAS CH₄-SYNGAS EN UN QUEMADOR DE MEDIO POROSO INERTE,» 2017.
- [5] K. Vafai, *Handbook of Porous Media*, Third Edition, 2015.
- [6] D. Trimis, M. Scheffler and P. Colombo, *Cellular Ceramics*, 2006.
- [7] H. Gao, Z. Qu, X. Feng and W. Tao, "Combustion of methane/air mixtures in a two-layer porous burner: A comparison of alumina foams, beads and honeycombs," *Elsevier*, 2013.
- [8] A. Bakry, A. Al-Salaymeh, A. Al-Muhtaseb, A. Abu-Jrai y D. Trimis, «Adiabatic premixed combustion in a gaseous fuel porous iner media burner under high pressure and temperature: Novel flame stabilization technique,» 2010.
- [9] L. Baiquan, D. Huaming, W. Chaoqun, L. Qingzhao y W. Ke, «Combustion characteristics of low concentration coal mine methane in divergent porous media burner,» 2014.
- [10] E. C., «Estudio teórico y experimental de la intercambiabilidad de la mezcla propano-gas de síntesis con respecto al gas natural,» 2013.