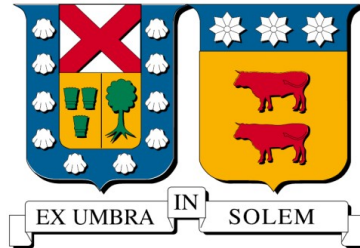


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO-CHILE



“INVESTIGACIÓN NUMÉRICA Y
EXPERIMENTAL DE UN FRENTE DE
COMBUSTIÓN EN UN REACTOR DE MEDIO
POROSO INERTE DE GEOMETRÍA CURVA”

JUAN PEDRO ALFARO HERNÁNDEZ

TESIS DE GRADO PARA OPTAR AL GRADO DE:
MAGISTER EN CIENCIAS DE INGENIERÍA MECÁNICA
Y AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. MARIO TOLEDO TORRES
PROFESOR CO-REFERENTE: DR. VALERI BUBNOVICH

ENERO - 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: INVESTIGACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE UN FRENTE DE COMBUSTIÓN EN UN REACTOR DE MEDIO POROSO INERTE DE GEOMETRÍA CURVA

Nombre del candidato(a): JUAN PEDRO ALFARO HERNÁNDEZ

Carrera / Grado: MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA

Campus: Casa Central Valparaíso ; Departamento: INGENIERÍA MECÁNICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, MARIO TOLEDO TORRES, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha:

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 30/03/2026

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO, CHILE

**INVESTIGACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL
DE UN FRENTE DE COMBUSTIÓN EN UN
REACTOR DE MEDIO POROSO INERTE DE
GEOMETRÍA CURVA**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
Y AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

JUAN PEDRO ALFARO HERNÁNDEZ

PROF. DIRECTOR: DR. MARIO TOLEDO TORRES

PROF. CO-DIRECTOR: DR. VALERI BUBNOVICH

DICIEMBRE, 2025

Agradecimientos

En primer lugar, quiero y debo agradecer a mi mamá y mi papá. Me han permitido vivir una vida tranquila, sin preocuparme por que me falte nada, siempre buscando que sea feliz. He tenido una vida privilegiada gracias a ellos, y las oportunidades que me han traído hasta donde estoy son producto de lo su amor. Todo el mérito es de ellos.

Gracias a mis hermanas, con las he tenido el agrado de crecer, y con quienes sé que podré contar en la vida por delante.

Gracias a quienes me ayudaron a sacar este trabajo adelante, apoyándome en lo que necesité, y enseñándome lo que no sabía. Gracias también a los profesores que tuve durante todos estos años en la universidad, y que me enseñaron lo necesario para llegar hasta este punto. Gracias a Federico Santa María por su obra, que me ha permitido estudiar aquí. Siempre diré con orgullo que soy Sansano.

Gracias a mis amigos y amigas, con los que he tenido la dicha de compartir todos estos años. Han logrado que mi paso por la universidad haya sido una etapa maravillosa y una alegría tremenda.

Si quisiera nombrar a toda la gente que he conocido y con quienes he compartido estos años, no terminaría nunca. También estoy muy agradecido de eso. Gracias a todos con quienes he cruzado camino, estén aún cerca de mi o se hayan alejado. Todos han aportado a que sea la persona que soy hoy. Gracias por hacer de esta una vida increíble.

Resumen

En este trabajo, se investiga numérica y experimentalmente un frente de combustión de un reactor de medio poroso inerte de geometría curva.

En primer lugar, se introduce el concepto de combustión en medios porosos inertes (MPI), explicando sus diferencias y ventajas sobre la combustión de llama libre. Se presentan campos de aplicación de este tipo de procesos, en base a una revisión de la literatura e investigaciones previas publicadas. Se observa que la investigación para combustión en medio poroso inerte se ha centrado en diferentes materiales y formas del medio poroso, uso de nuevos combustibles, y búsqueda de parámetros operacionales óptimos, pero todos con algo en común: los reactores o quemadores siempre son lineales, con el flujo de gases siguiendo una trayectoria recta; no se ha encontrado ningún estudio con geometrías curvas.

En el marco teórico, se explica en qué consiste un proceso de combustión general, para luego revisar los procesos que ocurren específicamente en combustión en MPI. A continuación, se presenta un modelo matemático para la combustión en MPI, compuesto por las ecuaciones de estado para un gas ideal y de conservación de masa, momentum, especie química, y energía para la fase sólida y gaseosa, junto a los supuestos que se asumen para el modelo. Es importante destacar que todas estas ecuaciones no serán resueltas en este trabajo, centrándose únicamente en la de conservación de masa y momentum, pero aún así es de importancia presentarlas, para poder entender el fenómeno a estudiar desde una base matemática y física. En el capítulo siguiente, se introducen los reactores de MPI de flujo recíproco, que permiten aprovechar el fenómeno de combustión superadiabática. Se propone un nuevo diseño de reactor de MPI recíprocante, pero con una geometría circular, que permitirá sacar máximo partido de dicho fenómeno. El diseño, futura fabricación y estudio de este reactor, son parte del proyecto Fondecyt de Exploración 13240110, proyecto en el cual se enmarca este trabajo. Para el enfoque experimental, se detalla primero el proceso de instalación del reactor curvo, con todas sus etapas, desde la estructura hasta la instrumentación científica, para la medición y control de flujos, temperaturas y emisiones. Se define la metodología de trabajo, donde se

utilizará un lecho empacado de esferas de alúmina como MPI, y gas natural como combustible, con distintas combinaciones de velocidad de filtración y relación de equivalencia, todas en el rango de mezcla ultra-pobre. Se obtuvieron resultados como temperaturas, velocidades del frente de combustión para tres radios de curvatura dentro del reactor, buscando estudiar el efecto de la curva, emisiones de contaminantes y pérdidas de calor hacia el ambiente.

En el enfoque computacional, se trabajará con un flujo de aire, sin proceso de combustión. Se realiza primero una simulación en dos dimensiones de un cilindro recto, con y sin medio poroso, para validar el modelo y entender el efecto del medio poroso sobre el flujo. Después, se simula el codo en tres dimensiones, sin medio poroso, para entender los efectos de la curva sobre el fluido, y posteriormente agregar la fase sólida y comparar como ambos efectos interactúan y afectan al flujo, buscando explicar los fenómenos observados en el enfoque experimental, desde la hidrodinámica.

Para concluir, se presentan los resultados de ambos enfoques, combinándolos para buscar entender de mejor forma el comportamiento de un frente de combustión en una curva, y se entregan recomendaciones para trabajos futuros.

Índice

Índice de Figuras	8
Índice de Tablas	11
1. Introducción	12
1.1. Motivación	12
1.2. Combustión en medios porosos inertes	13
1.3. Aplicaciones de la combustión en MPI	20
2. Objetivos	25
3. Marco teórico	26
3.1. Combustión	26
3.2. Combustión superadiabática	29
3.3. Modelo matemático para combustión en MPI	36
4. Diseño del reactor	40
4.1. Reactores de flujo recíproco	40
4.2. Nuevo diseño de reactor	42
4.3. Definición del problema	48
5. Enfoque experimental	50

5.1. Instalación del reactor	50
5.2. Instrumentación	54
5.3. Metodología	56
5.4. Resultados y análisis	60
6. Enfoque computacional	70
6.1. Metodología	72
6.2. Cilindro recto	78
6.3. Codo de 90°	82
6.4. Análisis de los resultados	94
7. Conclusiones y recomendaciones para la continuidad	96
7.1. Conclusiones	96
7.2. Recomendaciones para trabajos futuros	98
Bibliografía	100
Anexos	105

Índice de Figuras

1.1. Reactor MPI con llama libre (izq.) y llama sumergida (der.)	15
1.2. Energía del gas con y sin recirculación de calor	16
1.3. Lecho empacado de esferas (izq.) y espuma cerámica (der.)	17
1.4. Quemadores industriales	21
1.5. Quemadores de cocinas con MPI	22
1.6. Quemador anular de MPI	23
3.1. Esquema de un reactor de MPI con dos regiones con distintos tamaños de poro	35
4.1. Esquema de un reactor de flujo recíproco	41
4.2. Perfil de temperatura en un RFB	42
4.3. Diagrama del nuevo modelo de reactor propuesto	43
4.4. Diseño alternativo para el reactor	44
4.5. Dibujo de reactores con dos diámetros distintos	47
4.6. Posibles formas de propagación del frente de combustión en una curva	49
5.1. Tubería con un casquete en el laboratorio de Termofluidos.	51
5.2. Reactor instalado y encendido	52
5.3. Diagrama de instalación experimental	53
5.4. Temperaturas para $u = 0.8 [m/s]$ y $\phi = 0.35$	62
5.5. Temperaturas para $u = 1.0 [m/s]$ y $\phi = 0.20$	62

5.6.	Temperaturas para $u = 1.5$ [m/s] y $\phi = 0.25$	63
5.7.	Temperatura de combustión superadiabática.	64
5.8.	Velocidades del frente de combustión	66
5.9.	Imágen térmica del reactor	67
5.10.	(a) Imágen térmica del reactor. (b) Perfil de temperatura en la línea blanca de (a).	68
6.1.	Vórtices de Dean en la sección transversal de un codo	71
6.2.	Líneas de medición de perfiles de velocidad para el codo.	73
6.3.	Estudios de variación radial de porosidad	77
6.4.	Perfiles de velocidad para un cilindro recto sin medio poroso, con $Re = 20$	79
6.5.	Desarrollo del perfil de velocidad para un cilindro con porosidad constante.	80
6.6.	Desarrollo del perfil de velocidad para un cilindro con porosidad variable radialmente.	81
6.7.	Resultados de Taibi et al. (2021) para $Re = 500$	83
6.8.	Líneas de corriente en la salida de un codo sin medio poroso.	84
6.9.	Magnitud de velocidad a lo largo de un codo sin medio poroso.	85
6.10.	Desarrollo de perfil de velocidad para un codo sin medio poroso.	86
6.11.	Líneas de corriente en la salida de un codo con porosidad constante.	87
6.12.	Magnitud de velocidad a lo largo de un codo con porosidad constante.	88
6.13.	Desarrollo de perfil de velocidad para un codo con porosidad constante.	89
6.14.	Porosidad como función del radio en un codo de 90°	90
6.15.	Magnitud de velocidad a lo largo de un codo con porosidad variable en función del radio.	91
6.16.	Desarrollo de perfil de velocidad para un codo con porosidad variable en función del radio.	93
7.1.	Temperaturas para $u = 0.8$ [m/s] y $\phi = 0.20$	105

7.2.	Temperaturas para $u = 0.8$ [m/s] y $\phi = 0.25$	106
7.3.	Temperaturas para $u = 1.0$ [m/s] y $\phi = 0.25$	106
7.4.	Temperaturas para $u = 1.0$ [m/s] y $\phi = 0.35$	107
7.5.	Temperaturas para $u = 1.5$ [m/s] y $\phi = 0.35$	107

Índice de Tablas

3.1. Valores de ϕ y λ para distintas mezclas	28
5.1. Valores de u y ϕ utilizados	58
5.2. Flujos volumétricos utilizados	60
5.3. Resultados de las pruebas experimentales	61
5.4. Temperaturas adiabáticas y máximas obtenidas.	63
5.5. Emisiones de CO [%vol]	68
5.6. Emisiones de NO [ppm]	69
5.7. Emisiones de HC [ppm]	69

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El calentamiento global consiste en el aumento sostenido de las temperaturas en la Tierra, debido a la acumulación de gases de efecto invernadero, que atrapan el calor del sol, produciendo un aumento generalizado de temperaturas en todo el globo. La humanidad es el principal responsable de este fenómeno, pues desde mediados del siglo XIX, con la revolución industrial, ha aumentado considerablemente la quema de combustibles fósiles, como petróleo, carbón y metano, que producen los ya mencionados gases de efecto invernadero. Hemos sido irresponsables respecto al mal llamado progreso, pues se ha llevado a cabo sin medir el impacto que tendrá, depredando los recursos naturales del planeta, sin prestar atención a las consecuencias desastrosas que esto traerá para el futuro, que cada vez está más cerca. Destrucción de hábitats y ecosistemas, pérdida de biodiversidad, extinción masiva de especies animales y vegetales, aumento del nivel del mar, cambios en el clima como sequías, inundaciones, desertificación, junto con los grandes desplazamientos de población a zonas más habitables y escasez de recursos y espacio, son algunas de las tantas consecuencias que tendrán las acciones de la humanidad si no se toman las medidas a tiempo.

Dentro de las causas de este problema, está el uso excesivo de recursos para satisfacer, de forma muy ineficiente, nuestras necesidades y comodidades. A medida que “progresamos”, aparecen nuevas necesidades, y se necesitan más recursos materiales y energéticos para satisfacerlas. Es en estos últimos, los recursos energéticos, en los que se enmarca este trabajo. Todas las actividades que realizamos, desde las funciones básicas que realiza nuestro cuerpo

de forma inconsciente, hasta los complejos sistemas electrónicos que nos rodean a toda hora hoy en día, incluyen transformaciones de energía. La energía puede manifestarse de muchas formas, como energía química, cinética, potencial, eléctrica, pero hay una que ha acompañado a la humanidad desde hace miles de años: el fuego. El fuego, o de forma más técnica, la energía térmica y combustión, han permitido que la humanidad llegue hasta donde nos encontramos hoy. Desde las sociedades más primitivas, hasta la sociedad contemporánea, los procesos de combustión han jugado un rol crucial: se usa para preparar alimentos, para la calefacción en días y noches fríos, y para otras necesidades que han surgido en el camino, como los motores de los automóviles y otros vehículos, que realizan un proceso de este tipo para generar el movimiento, o la electricidad que consumimos durante todo el día, producida en plantas de potencia, que en muchos casos, incluyen un proceso de combustión.

Se han realizado esfuerzos, aunque hasta ahora no suficientes, para revertir esta situación, pues el problema es mucho más profundo: es imposible sostener un crecimiento infinito, en un planeta con recursos finitos. Dentro de los esfuerzos, aparecen las energías renovables no convencionales, como la energía solar fotovoltaica o la eólica, como una alternativa para la producción de energía eléctrica, sin emisión directa de gases de efecto invernadero ni sustancias contaminantes, o la energía nuclear, que permite obtener cantidades gigantescas de energía con muy pocos recursos y produciendo pocos desechos. Sin embargo, hay quienes creen que los procesos de combustión jamás podrán ser completamente eliminados, y que ven en ellos un complemento a otros tipos de energía, e incluso la solución. De aquí nace la necesidad de estudiar nuevos combustibles o cómo mejorar los procesos de combustión: si estos van a quedarse, que no contribuyan al calentamiento global, y que sean un aporte positivo para la humanidad y el planeta.

1.2. Combustión en medios porosos inertes

Un proceso de combustión clásico o de llama libre, como por ejemplo, el quemador de una cocina, ocurre en fase gaseosa. Los reactantes, es decir, el combustible y el oxidante, que en la mayoría de los casos es aire, están en forma de gas, y es ahí donde ocurre la reacción exotérmica de liberación de energía y formación de productos, que también están en estado gaseoso. Una desventaja de la combustión de llama libre, es que gran parte de la energía de combustión se pierde, en forma de energía sensible en los gases producto, que escapan a alta temperatura, lo que no permite usar completamente la energía química obtenida del

combustible . Otra desventaja, es que en la combustión de llama libre, es más difícil controlar la emisión de contaminantes, como hidrocarburos no quemados, UHC por las siglas en inglés *Unburned hydrocarbons*, óxidos de nitrógeno (NO y NO₂, conocidos en conjunto como NO_x) y monóxido de carbono (CO). Este último, por ejemplo, es un gas muy nocivo para la salud, pues al respirarlo impide el transporte de oxígeno en la sangre, pudiendo causar daños a tejidos e incluso la muerte, y se produce por la combustión incompleta de hidrocarburos, es decir, es un producto intermedio de la reacción de oxidación, que debido a la falta de oxígeno o de mayor tiempo de residencia en la zona de reacción, no logró convertirse en dióxido de carbono, que es el producto final. Por su parte, los óxidos de nitrógeno son considerados uno de los contaminantes más críticos que pueden formarse, pues contribuyen al smog fotoquímico, formación de precursores de lluvia ácida, destrucción de la capa de ozono, y calentamiento global (Bowman, 1992 [7]), además de problemas respiratorios. Los UHC son también productos intermedios de la reacción del combustible, que pueden ser liberados a la atmósfera si no se realizó una combustión completa, contribuyendo al efecto invernadero y otros problemas de salud si son respirados. Otro obstáculo en la combustión de llama libre, son problemas de inestabilidad de llama, es decir, que no pueda sostenerse el proceso de combustión, y la llama termine por apagarse.

En la década de los 70, se propuso una idea que permitiría mejorar los procesos de combustión: *Excess enthalpy combustion*, o Combustión con exceso de entalpía en español. Se proponía que, si fuera posible transferir calor desde los productos de combustión calientes, hacia los reactantes fríos, sin diluir estos últimos con los primeros, podría alcanzarse temperaturas de llama más altas que las que permiten los reactantes en su estado inicial. Para esto, inicialmente se implementaron sistemas con tuberías como intercambiadores de calor, que permitieran transferir la energía desde los productos a los reactantes. Más adelante, en lugar de recircular el calor de forma externa al proceso de combustión, se propuso hacerlo de forma interna, uniendo los procesos de combustión y transferencia de calor [43]. Es así como nace el concepto de los reactores de medios porosos inertes (MPI por sus siglas en español; también se utiliza ampliamente la abreviación PMC, por las siglas en inglés: *Porous media combustion*). En estos, a la combustión en fase gaseosa, se le agrega una fase sólida. Esta fase sólida tiene poros, es decir, pequeños espacios vacíos, interconectados entre si, que permiten que el gas atraviese la fase sólida, y es conocida como medio poroso, matriz sólida, y otros nombres similares. El adjetivo “inerte”, viene del hecho de que la fase sólida no participa en la reacción química, ni como reactante ni como catalizador; participa únicamente en procesos físicos, como el



Figura 1.1: Reactor MPI con llama libre (izq.) y llama sumergida (der.)

intercambio de calor o la obstaculización del flujo de gas.

La reacción de combustión sigue ocurriendo únicamente en fase gaseosa, en los poros, pero la fase sólida aporta muchas ventajas, que hacen de esta una opción viable para mejorar los procesos de combustión y combatir el cambio climático. En la fig. 1.1, se puede observar un reactor de medio poroso inerte, con esferas de alúmina como matriz sólida. En la fotografía de la izquierda, se ve una llama libre, fuera del medio poroso, pues fue tomada justo después de encenderlo en la parte superior, mientras que en la foto de la derecha el frente ya está sumergido o confinado en la matriz sólida, que es como debe operar normalmente un reactor MPI.

La reacción de combustión libera energía, y calentará los gases de combustión, pero también la fase sólida, gracias al fenómeno de convección entre gas-sólido. La matriz sólida tiene propiedades más adecuadas para la transferencia de calor que la fase gaseosa, por lo que el calor recibido por la matriz en la zona donde ocurre la combustión, se transfiere fácilmente al resto del reactor, debido a los efectos de conducción térmica al interior del sólido, y de radiación de sólido a sólido. El medio poroso dificulta el paso del gas, pues este solo puede pasar a través de los poros, y se encuentra constantemente con el sólido como obstáculo, por lo que el gas permanecerá más tiempo al interior del reactor, lo que permitirá, por ejemplo, que los productos intermedios de la cinética química de reacción puedan convertirse completamente en los productos finales, disminuyendo las emisiones de contaminantes, y además, aprovechar mejor la energía térmica almacenada en los productos de combustión, pues estos gases, que salen a altas temperaturas, al estar durante un mayor tiempo en contacto con el sólido, y con un gran área de contacto, podrán transferirle su calor a la matriz porosa,

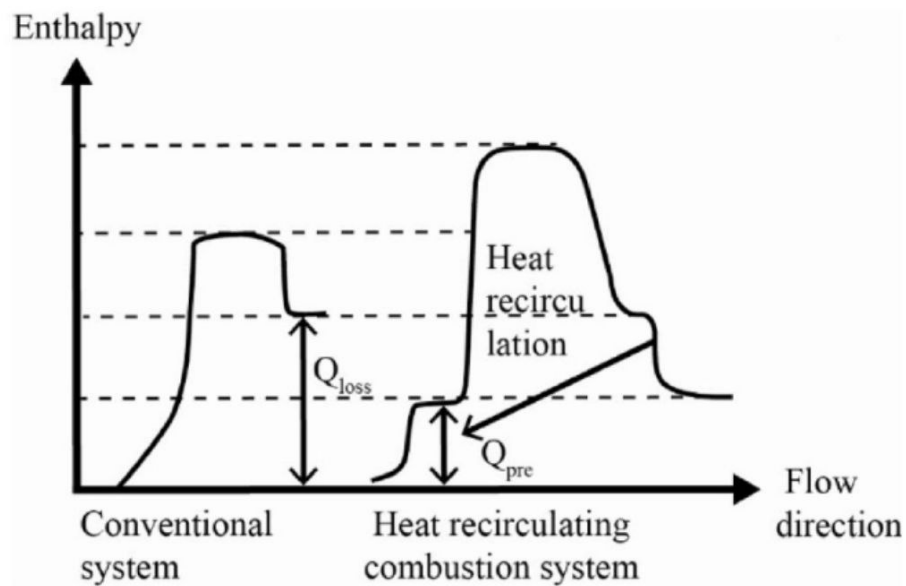


Figura 1.2: Energía del gas con y sin recirculación de calor [36]

que, como se señaló antes, transmite el calor de manera más efectiva a lo largo del reactor. Este calor, almacenado en el sólido, es a su vez transmitido a los reactantes, aguas arriba de la zona de combustión, por convección sólido-gas. Así, se produce una recirculación y mejor aprovechamiento del calor: la energía química contenida en el combustible se transforma en calor, lo que calentará la matriz sólida, que distribuirá el calor por todo el reactor y calentará nuevamente el gas, como se muestra en la fig. 1.2.

Es evidente que el sólido que se utiliza tiene una gran influencia sobre el desempeño del reactor. Para que este pueda transmitir el calor a lo largo del reactor, debe tener ciertas propiedades que lo hagan adecuado: una buena conductividad térmica, alta emisividad y resistencia a altas temperaturas, además de ser inertes. Los materiales cerámicos son el medio poroso inerte por excelencia, utilizados en prácticamente todas las aplicaciones, debido a que cumplen muy bien con los requisitos mencionados, siendo los más utilizados alúmina Al_2O_3 , carburo de Silicio SiC y zirconia ZrO_2 . Estos materiales pueden a su vez presentarse en distintas formas, lechos empacados o espumas. Los lechos empacados consisten en apilar pequeños cuerpos, que naturalmente dejarán espacio entre ellos, dando lugar a los poros. Lo más común es utilizar esferas, aunque también se han estudiado otras geometrías. Las espumas son una pieza de material que ya tiene los poros incorporados, y debe fabricarse para que calce con la forma del reactor. En la fig. 1.3 se puede ver fotografías de esferas y espumas cerámicas. Bubnovich et al. (2021) estudiaron distintas geometrías para espumas



Figura 1.3: Lecho empacado de esferas (izq.) y espuma cerámica (der.)

cerámicas [8] y Yan et al. (2022) comparan el desempeño de espumas de distintos materiales [44].

El uso de MPI hace necesaria la introducción de otro parámetro físico, que no depende únicamente del material, si no también de la forma de este: **la porosidad ϵ , definida como la razón entre el volumen de los poros (o de fluido) y el volúmen total de sólido + fluido** Las esferas alcanzan porosidades entre 30 y 50%, mientras que las espumas pueden llegar hasta valores de 90%.

Los reactores de MPI cuentan con varias ventajas por sobre la combustión de llama libre. Su principal ventaja es la **estabilidad de la llama** y la **extensión de los límites de flamabilidad**, conceptos que están relacionados entre si. Para que una llama sea considerada estable, debe ser capaz de mantener la combustión al variar en cierto grado las condiciones, como los flujos de aire y combustible, o fenómenos de turbulencia [39]. Los límites de flamabilidad, se definen como la concentración máxima y mínima de combustible en la mezcla, entre las que se puede encender la llama e iniciar un proceso de combustión. Se conocen como límite de flamabilidad superior, UFL por sus siglas en inglés *Upper flammability limit*, y límite de flamabilidad inferior, LFL por *Lower flammability limit*, respectivamente. En general, al utilizar una mezcla pobre de combustible-aire, esto es, con bajo contenido de combustible, no es posible sostener la combustión, pues no hay suficiente energía disponible que permita

mantener la temperatura y por lo tanto la reacción, por lo que la llama se apaga. Una mezcla muy rica en combustible tampoco permitirá mantener la combustión, pues no encontrará suficiente oxígeno para reaccionar. Gracias a la recirculación de calor que existe en los reactores de MPI, estos se presentan como una gran solución para estabilizar premezclas pobres de aire combustible. Como se muestra en la fig. 1.2, el calor se transmite desde la zona aguas abajo de la llama, donde están los gases producto, hacia la zona aguas arriba de la llama, donde están los reactantes. Calentar los reactantes les entrega la energía de activación necesaria y permite alcanzar un mayor grado de reacción, lo que permitirá usar la mezcla más pobre, con menor contenido energético, sin comprometer la estabilidad de la llama. Para una llama libre, el límite de flamabilidad inferior para el metano (CH_4) es una concentración de 5% en volumen en aire [30], que corresponde a una relación de equivalencia de $\phi = 0.5$. Para el caso de reactores de MPI, se han reportado límites de flamabilidad más bajos, como los trabajos de Hsu, Evans y Howell [24], en el que se alcanzó un LFL de $\phi = 0.41$, el trabajo experimental de Kotani, Behbahani y Takeno [29], en el que lograron combustionar gas natural con una relación de equivalencia de 0.151. El obtener llamas estables para mezclas ultra-pobres, por debajo del límite de flamabilidad convencional, expande los usos que se le puede dar a los reactores MPI, pero esto será revisado con más detalle en la siguiente sección.

Otra ventaja muy importante de este tipo de reactores, por sobre la combustión de llama libre, es la **reducción de emisiones de sustancias contaminantes**. Como se mencionó anteriormente, las principales sustancias nocivas que pueden generarse de un proceso de combustión, son los NO_x , CO y UHC. Los dos últimos, son productos intermedios de la reacción de oxidación de hidrocarburos, como los combustibles fósiles o el gas natural, que son liberados a la atmósfera si no se alcanza una combustión completa. Trabajar con una relación de equivalencia alta lleva a una combustión incompleta. En el caso de los reactores de MPI, aún cuando se tenga más aire del requerido para la reacción estequiométrica ($\phi < 1$), lo que en general llevaría a una combustión completa, podrían producirse acumulaciones de combustible en los poros, formando mezclas ricas localmente que generen mayores emisiones de CO o UHC. Una relación de equivalencia muy baja también podría producir un aumento en las emisiones de estos contaminantes, pues estas mezclas contienen menor poder calorífico, lo que podría llevar a que ocurra un enfriamiento local y extinción de la llama en algunos poros, conocido como *quenching*, lo que también contribuye a una combustión incompleta e incremento de emisiones. Barcellos et al. [5] determinaron que, para diferentes velocidades de flujo, el rango $0.3 < \phi < 0.7$ permite obtener las menores emisiones de CO para la combustión de metano. Así, la combustión en MPI se presenta como una gran alternativa para disminuir

la emisión de estos contaminantes, pues permite trabajar con mezclas con mayor contenido de oxígeno, sumado a un tiempo de residencia mucho mayor en el reactor y a una distribución de temperatura más uniforme, hace mucho más probable alcanzar una combustión completa, transformando estos productos intermedios en el producto final, CO_2 , antes de ser liberados a la atmósfera. El control de NO_x puede ser un poco más complejo. En general, existen tres mecanismos para la formación de NO_x : de Zeldovich (o térmico), de Fenimore (o *prompt*), y de combustible. El mecanismo de Zeldovich es, en general, el que aporta con mayores emisiones, se produce por la reacción del oxígeno y nitrógeno, presentes en el aire. Esta reacción tiene una alta energía de activación, por lo que solo ocurre a altas temperaturas (de ahí el nombre "térmico"), por sobre 1500°C , y las emisiones aumentan drásticamente con el aumento de temperatura [22]. El mecanismo de Fenimore, ocurre por la reacción de especies intermedias de la combustión de hidrocarburos, principalmente CH y CH_2 , con N_2 . Las moléculas formadas, después pueden reaccionar con O_2 , hasta llegar a formar NO_x [16, 22]. Para mezclas muy ricas en combustible, en la que existirán muchos de estos radicales intermedios disponibles, este mecanismo se ve potenciado, pudiendo incluso sobrepasar al térmico. El NO_x de combustible, se produce por la reacción de átomos de nitrógeno presentes en el combustible. Generalmente, para la combustión de hidrocarburos, este mecanismo es despreciable, pero para otros combustibles con un mayor contenido de nitrógeno podría representar una cantidad importante de emisiones. En los últimos años, buscando disminuir la acumulación de gases de efecto invernadero, se ha presentado el amoníaco (NH_3) como un combustible alternativo a los fósiles, que al igual que el hidrógeno, no produce CO_2 , pero tiene la gran desventaja de aumentar considerablemente las emisiones de NO_x [35]. La idea de utilizar amoníaco como combustible es reciente, por lo que aún es necesario más investigación para controlar este último método de formación de óxidos de nitrógeno. Para los mecanismos de Zeldovich y Fenimore, los reactores de MPI aparecen como una gran alternativa para mitigar las emisiones de este contaminante, pues en estos reactores proveen una distribución de temperatura más uniforme, disminuyendo los picos de temperatura que contribuyen a la formación térmica, y al trabajar con una mezcla con mayor contenido de aire, reduce la cantidad de hidrocarburos no quemados, que contribuyen al *prompt* NO_x [17].

Debido a la recirculación de calor ya mencionada, es que es posible **alcanzar temperaturas mucho más altas** que las que podrían obtenerse en un proceso de combustión convencional. En el trabajo de Hanamura, Echigo y Zhdanok [20], con una simulación computacional de un reactor reciprocante (este concepto será explicado más adelante), se observa que la diferencia entre la temperatura máxima del gas en un MPI y su temperatura inicial, es hasta

13 veces mayor a la diferencia entre la temperatura máxima teórica y la temperatura inicial. Dependiendo de la aplicación que se le quiera dar al proceso de combustión, este aumento de temperatura puede ser beneficioso, pues permitiría, por ejemplo, utilizar una mezcla pobre para alcanzar temperaturas de llama que normalmente se alcanzan con una mezcla muy rica, disminuyendo el uso de combustible y la emisión de contaminantes; sin embargo, alcanzar temperaturas muy altas podría potenciar la emisión de NO_x térmico, o poner en riesgo los componentes del reactor, por lo que esta debe mantenerse controlada.

1.3. Aplicaciones de la combustión en MPI

De nada sirven todas las ventajas y avances de una nueva tecnología, si esta se queda por siempre en un laboratorio, solo para ser estudiada. Afortunadamente, no es el caso de los reactores de medios porosos inertes, que cuentan con multitud de aplicaciones, tanto para el ámbito industrial como para el cotidiano. Abdul Mujeebu et al. (2009) y Gharehghani et al. (2021) [1, 17] recopilaron información de muchos estudios, y también sobre la aplicación de MPI.

Los motores de combustión interna, utilizados tanto para producir potencia a nivel industrial, como para automóviles, buses y camiones, pueden ser beneficiados con la implementación de los medios porosos. En estos motores, es común que existan puntos calientes, con temperaturas mucho más altas que en el resto de la cámara de combustión, y muchos productos de combustión incompleta, que como se señaló anteriormente, son dañinos para la salud y medioambiente. Esto se debe al poco tiempo de residencia en la cámara de combustión, pues en un motor los ciclos son muy rápidos, y a la distribución no uniforme de temperatura. Añadir un medio poroso al interior del cilindro (fuera de la carrera del pistón), permitiría mejorar la transferencia de calor entre los gases, logrando una distribución de temperatura mucho más uniforme y con menores puntos calientes, facilitando alcanzar una combustión completa, mejorando la eficiencia de combustible utilizado y disminuyendo la emisión de contaminantes del motor.

Muchos procesos industriales hacen uso de hornos o quemadores. Estos pueden ser también beneficiados por el uso de MPI y la radiación infrarroja. En lugar de usar una llama libre, se utiliza una superficie de medio poroso. La llama se estabiliza al interior de este, que calentará la fase sólida, y emitirá calor por radiación desde su superficie libre debido a su alta temperatura. Como ya se señaló antes, esto trae ventajas como un menor consumo de combustible debido al mejor aprovechamiento energético de la combustión en MPI, además de

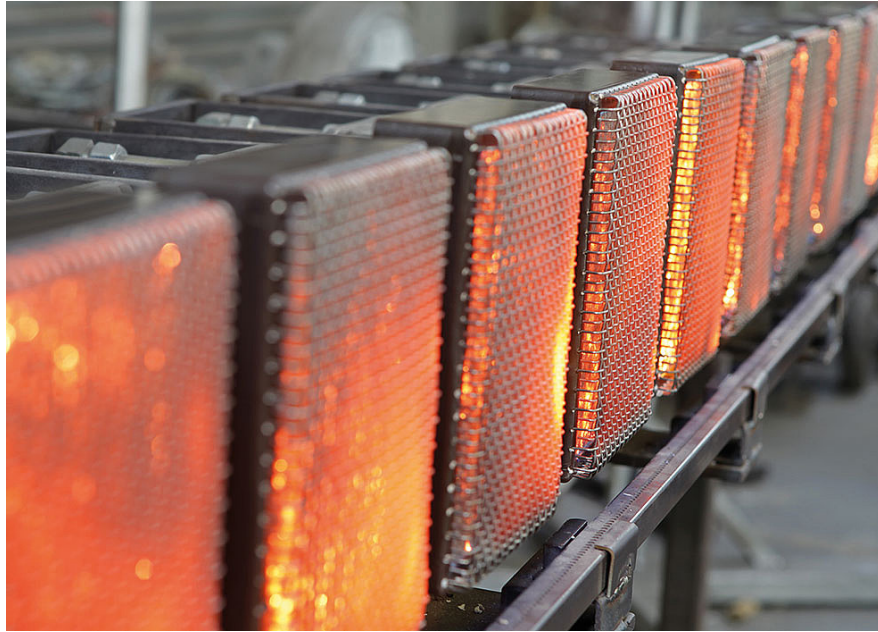


Figura 1.4: Quemadores industriales. (GoGaS Goch GmbH & Co. KG) [18]

que la transferencia de calor por radiación puede ser mucho más rápida que la transferencia de calor por convección que se tiene en una llama libre. Esto se ha utilizado, por ejemplo, en hornos de panaderías e industria manufacturera de vidrio, pudiendo extenderse a cualquier otra aplicación industrial que requiera hornos, como minería y papelería, como el que se muestra en la fig. 1.4, además de aplicaciones para la vida cotidiana, como el quemador para cocinas diseñado por Chih-Yung Wu, Kun-Ho Chen y Shou Yin Yang [10], presentado esquemáticamente en la fig.1.5, que permite mejorar la eficiencia del proceso de cocina y además disminuir la emisión de contaminantes, que podrían fácilmente terminar en los alimentos que se preparan.

Una aplicación de los reactores de MPI es utilizarlo junto a un intercambiador de calor para aprovechar el calor que se almacena en la matriz sólida. Para esto, podría ponerse un fluido a calentar en contacto con la superficie del reactor de MPI, como el que aparece en la fig. 1.6, en el que se tiene una tubería por el que circula el fluido que se busca calentar, como podría ser agua en un evaporador, rodeada por un MPI, en el que ocurre un proceso de combustión, y debido al aislante exterior que rodea al reactor, el calor se dirige hacia el fluido. Otra interesante combinación de MPI e intercambiadores de calor es el que se presenta en el trabajo de Delalic, Mulahasanovic y Ganic [13]: se instaló un compacto intercambiador de calor rodeando el reactor de MPI aguas arriba de la zona donde se estabilizó el frente de combustión, y otro en la salida del reactor, y lo proponen como posible uso para sistemas de

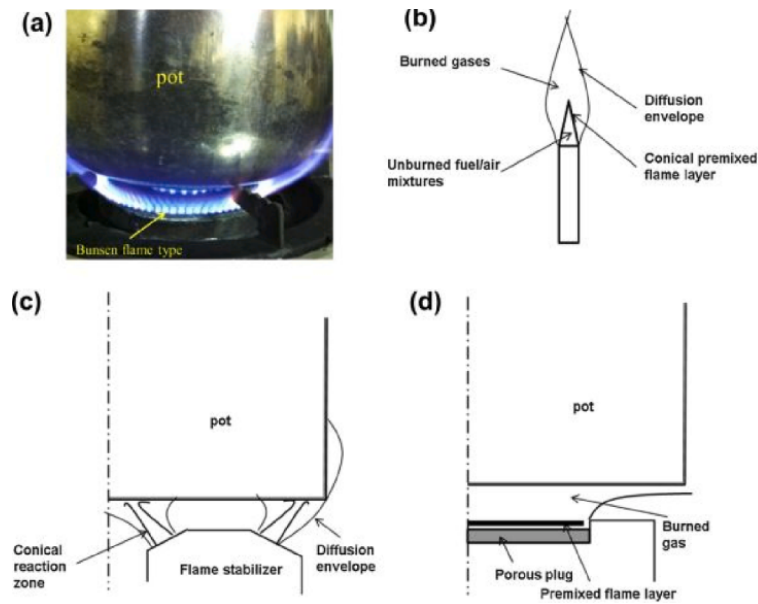


Figura 1.5: Esquema de (a) Un típico quemador de cocina; (b) geometría y estructura de una típica llama Bunsen; (c) aplicación de un quemador de cocina tradicional para cocinar y (d) aplicación de un quemador de llama plana [10]

calefacción central en edificios residenciales.

Otra área en la que brilla la combustión en MPI es para el tratamiento de gases con bajo poder calorífico. Estos pueden aparecer de diferentes procesos, como subproductos de actividades industriales, o de rellenos sanitarios, y su composición puede ser muy variada, incluyendo productos de combustión incompleta, como CO e hidrocarburos, o gas metano (CH_4) en el caso de rellenos sanitarios. Estos gases pueden quemarse, para aprovechar su contenido energético, y evitar que estos contaminantes lleguen a la atmósfera. El problema, es que generalmente estas emisiones vienen en pequeñas cantidades, diluidas en aire o en otros gases inertes, como CO_2 , por lo que la mezcla que se busca quemar, tiene un contenido energético muy bajo y una composición variable, lo que representa un problema para la estabilidad de la llama y para mantener el proceso de combustión. El método comúnmente utilizado para tratar estos contaminantes, es agregar combustible a la mezcla, para aumentar el contenido energético de esta y lograr sostener el proceso de combustión. La desventaja de esto, es el consumo adicional de combustible, y que además este puede generar mayores cantidades de gases de efecto invernadero. Los reactores de MPI aparecen como una alternativa para el tratamiento de gases. Como se ha demostrado, gracias a la recirculación de calor, estos mejoran la estabilidad de la llama y pueden operar con mezclas ultra-pobres, con un bajo contenido energético, lo que los vuelve idóneos para tratar estos gases. Al-Hamamre et al.

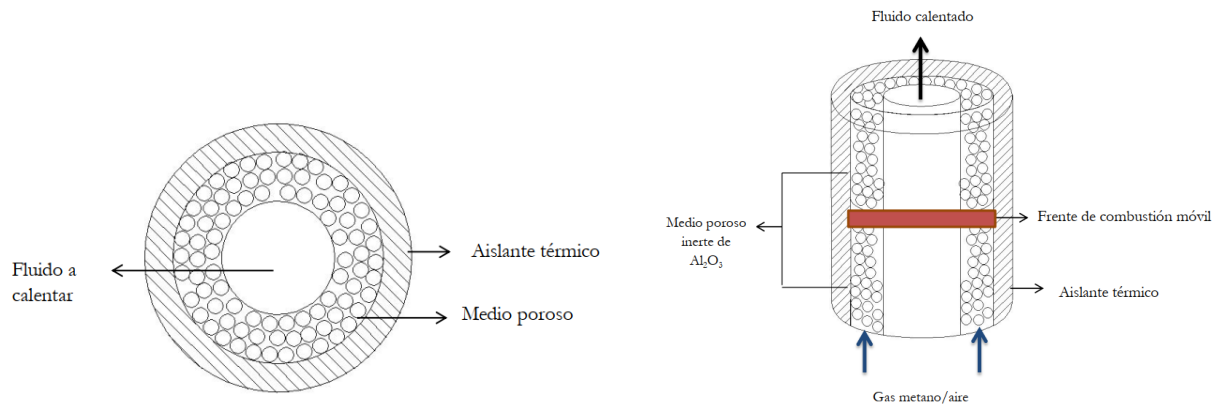


Figura 1.6: Esquema de un quemador anular de MPI [38]

(2006) estudiaron numérica y experimentalmente la combustión de gases obtenidos de rellenos sanitarios y pirólisis, logrando combustionar gases con bajo poder calorífico y establecer límites de operación para sus reactores [3].

Debido a la necesidad de descarbonizar la matriz energética mundial, para aminorar los efectos desastrosos del cambio climático, es que se están estudiando nuevos combustibles, que puedan reemplazar a los combustibles fósiles, basados en carbono y que liberan gases de efecto invernadero a la atmósfera tras ser utilizados. Dos opciones muy prometedoras son el gas hidrógeno (H_2) y el amoníaco (NH_3), pero ambos aún presentan desafíos para ser considerados como una opción viable a gran escala. Para ambos, los reactores de MPI se presentan como un gran alternativa, que permitirá potenciar su uso y desarrollo. En el caso del hidrógeno, si bien su principal problema actualmente es su transporte y almacenamiento, debido a la fragilización que produce en los materiales comunmente usados en ingeniería, los reactores de MPI han demostrado ser capaces de estabilizar llamas de hidrógeno, como el estudio de Muñoz Herrera et al. (2024) [34], en el que se utilizaron mezclas de CH_4 y H_2 , con hasta un 30% de hidrógeno. Sin embargo, en donde más se destaca este tipo de reactores, no es en la combustión de hidrógeno, sino en su producción. Es posible utilizar una mezcla rica de hidrocarburos (con menos aire del necesario para la combustión estequiométrica), para producir una oxidación térmica parcial, esto es, convertir el combustible en productos intermedios de combustión, como lo son H_2 y CO (mezcla conocida como gas de síntesis o *syngas* en inglés), en lugar de los productos de combustión completa (CO_2 y H_2O). Existen multitud de estudios relacionados a este proceso, y se ha logrado producir hidrógeno a partir de metano, etano, propano, heptano líquido y kerosene, según señalan Al-Hamamre y Al-Zoubi (2010) en su review de producción de hidrógeno en MPI [2]. Bajo el mismo principio,

es posible producir hidrógeno, gas de síntesis y azufre (S_2) a partir de la oxidación parcial de mezclas ricas de ácido sulfhídrico (H_2S) [6]. Para el caso del amoníaco, este en un principio fue considerado como un mecanismo de transporte de hidrógeno: La idea era producir hidrógeno, combinarlo con gas nitrógeno para producir amoníaco, y después transformar el amoníaco en hidrógeno nuevamente cuando se necesitase. Las ventajas del amoníaco es que su almacenamiento y transporte es mucho más sencillo, con una infraestructura ya existente para esto, debido a su extensivo uso en industrias como la agrícola y farmacéutica. Debido a estas ventajas, es que en los últimos años, se ha comenzado a estudiar el uso de amoníaco como combustible directamente, en lugar de un medio de transporte de hidrógeno. Comparado a los combustibles convencionales, el amoníaco podría considerarse un mal combustible: tiene una menor densidad energética que los combustibles convencionales, una velocidad de llama laminar mucho menor, tiene un menor rango de flamabilidad, requiere una mayor temperatura de ignición, la llama alcanza menor temperatura y es menos radiativa, y existe el riesgo de que aumenten las emisiones de NO_x [27]. Si bien esto parece una gran lista de desventajas, el hecho de que su combustión no emite gases de efecto invernadero, pues sus productos de combustión completa son N_2 y H_2O , lo convierten en una alternativa atractiva para combatir el cambio climático. Las ventajas mencionadas anteriormente de los reactores de MPI, como la extensión de los límites de flamabilidad, gran recirculación de calor y eficiencia energética, posicionan a esta tecnología como un gran candidato para impulsar al amoníaco como combustible del futuro.

Capítulo 2

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es estudiar numérica y experimentalmente el comportamiento de un frente de combustión en un reactor de medio poroso inerte de geometría curva tipo codo de tubería de noventa grados.

Para esto, se han propuesto los siguientes **objetivos específicos**:

1. Analizar el estado del arte y los avances en la investigación de la combustión en MPI, identificando brechas de conocimiento.
2. Diseñar, fabricar e instalar un reactor de MPI con geometría curva, con sistemas de medición y control de flujos, temperaturas y emisiones de gases.
3. Desarrollar pruebas con premezclas de gas natural-aire, con distintas velocidades de filtración y relaciones de equivalencia, de manera de reconocer el desempeño térmico del reactor y la propagación de un frente de combustión.
4. Investigar el comportamiento hidrodinámico del reactor mediante simulaciones computacionales de manera comprender el comportamiento de un frente de combustión.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Combustión

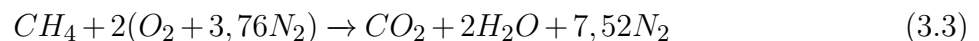
La combustión es un tipo de reacción química exotérmica, en que se combina un combustible (puede estar en estado sólido, líquido o gaseoso) y un comburente u oxidante, para transformarse en nuevos productos y liberar energía



El gas natural es un gas combustible, compuesto principalmente por metano (en general, por sobre un 90% de composición volumétrica), y en menores cantidades, otros hidrocarburos, dióxido de carbono, nitrógeno, ácido sulfhídrico y otros compuestos. La composición exacta varía dependiendo del yacimiento del que se extraiga, pero siempre predomina el metano, por lo que en general se utiliza este último para modelar el comportamiento del gas natural. La reacción de combustión completa de metano se expresa como



liberando una energía de combustión de $\Delta H = 802 \text{ kJ/kmol}$. Esta reacción considera oxígeno puro; si se utiliza aire, compuesto por aproximadamente un 79% de N_2 y un 21% de O_2 , la reacción es



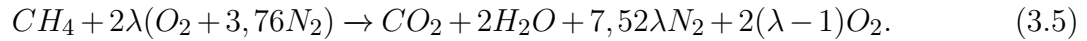
manteniendo los 2 kmol de oxígeno necesarios, y agregando $7,52 \text{ kmol}$ de nitrógeno, obteniendo un total de $9,52 \text{ kmol}$ de aire. El nitrógeno no participa en la reacción, por lo que la energía liberada se mantiene constante, pero si es importante considerarlo. Si se va a utilizar aire para la reacción química, que es lo más común porque está disponible en todas partes y es gratis, lo único que nos interesa obtener de este es su oxígeno, pero ya que es una mezcla, no se puede separar, y se debe utilizar el aire “entero”, o con todos sus componentes, por lo que se necesitan $9,52 \text{ kmol}$ de aire para combustionar 1 kmol de CH_4 , en lugar de los 2 kmol que se requieren si se utiliza oxígeno puro.

Esta reacción, tanto si se considera oxígeno puro o aire, se conoce como reacción estequiométrica, pues se tiene la cantidad exacta de reactantes, para que estos se transformen completamente en productos. Si la proporción entre los reactantes es distinta a la de la reacción estequiométrica, entonces algunos reactantes reaccionarán completamente, mientras que los que estaban en exceso, aparecerán también en los productos, sin reaccionar. Para los procesos de combustión, rara vez se trabaja con una relación estequiométrica, y siempre se presenta un reactante en mayor proporción. En general, se busca que todo el combustible, en este caso, CH_4 , reaccione completamente, para lograr que toda la energía química almacenada en el combustible se transforme en energía térmica, y también para evitar la emisión de sustancias contaminantes. Para garantizar que todo el combustible se queme, puede utilizarse una mezcla con más aire del necesario, de tal forma que cada molécula de combustible tenga más moléculas de oxígeno alrededor, aumentando la probabilidad de que estas reaccionen entre si y se lleve a cabo un proceso de combustión completa. La cantidad de aire adicional que se utiliza en la mezcla, puede cuantificarse utilizando la razón de equivalencia de aire, o razón de aire teórico:

$$\lambda = \frac{\text{Aire utilizado}}{\text{Aire estequiométrico}} = \frac{(x_{air}/x_{comb})_{real}}{(x_{air}/x_{comb})_{esteq.}} = \frac{(n_{air}/n_{comb})_{real}}{(n_{air}/n_{comb})_{esteq.}} \quad (3.4)$$

donde n_i y x_i representan, respectivamente, la cantidad de moles y la fracción molar de aire o combustible en la mezcla. Para $\lambda < 1$, significa que se tiene menos aire del necesario para quemar todo el combustible, por lo que la combustión será incompleta, pudiendo aparecer productos intermedios (como CO u otros hidrocarburos) o combustible en los productos. Con $\lambda = 1$ se tiene una combustión estequiométrica, y en teoría, no debería quedar ningún reactante al final del proceso. Si $\lambda > 1$, significa que se tiene más aire del requerido para la relación estequiométrica, por lo que que aparecerá oxígeno sin reaccionar en los productos de combustión, y será más probable obtener una combustión completa del combustible. Para este último caso, a menudo se utiliza también el concepto de exceso de aire, que hace referencia

a cuanto aire adicional al estequiométrico se está utilizando: por ejemplo, para un $\lambda = 1.2$, se tiene un exceso de aire de 0.2, o de 20%. Así, la reacción química de la eq. 3.3, cuando se tiene un exceso de aire, puede expresarse como



En lugar de λ , es posible usar también su inverso, la relación de equivalencia de combustible:

$$\phi = \frac{1}{\lambda} = \frac{(n_{comb}/n_{air})_{real}}{(n_{comb}/n_{air})_{esteq.}}. \quad (3.6)$$

Se introducen también los conceptos de mezcla pobre y mezcla rica. Para $\phi > 1$, se tiene una mayor cantidad de combustible, y se conoce como mezcla rica, mientras que $\phi < 1$ representa menos combustible del estequiométrico (o un exceso de aire) y se conoce como mezcla pobre.

Tabla 3.1: Valores de ϕ y λ para distintas mezclas

Tipo de mezcla	ϕ	λ
Mezcla rica (Más combustible)	<1	>1
Mezcla estequiométrica	1	1
Mezcla pobre (Más aire)	>1	<1

De aquí en adelante, se utilizará principalmente ϕ en lugar de λ , y cuando se utilice el término “relación de equivalencia”, sin especificar si es de aire o combustible, se entenderá que se refiere a esta última, ϕ .

Para calcular la energía liberada por el proceso de combustión, se utiliza la entalpía de formación. Esta corresponde a “la entalpía de una sustancia en un estado especificado debido a su composición química” (Cengel y Boles, 2006 [9]), y se relaciona con la energía liberada y la entalpía sensible según la ecuación

$$Q = H_{prod} - H_{react} \quad (3.7)$$

$$Q = \sum N_P(\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_P - \sum N_R(\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_R$$

donde

- o Q es el calor [kJ].

- N es el número de mol de cada especie [kmol].
- \bar{h}_f° es la entalpía de formación de cada especie [kJ/kmol].
- \bar{h} es la entalpía sensible [kJ/kmol].
- \bar{h}° es la entalpía de referencia [kJ/kmol].

El estado de referencia es el mismo para todas las especies, y en general es a 25°C y 1 atm. Para los valores de entalpías, sensible y de formación, existen libros que presentan estos valores en tablas. Se suele utilizar 1 kmol de combustible, y el aire y los productos se ajustan a esto, para obtener una medida de cuanta energía se libera por cada kmol de combustible que reacciona.

Un caso de interesante estudio de esta ecuación, es para $Q = 0$, es decir, un proceso adiabático. En este caso, teniendo las entalpías de formación y la temperatura de entrada de los reactantes, es posible calcular la temperatura de los productos, que corresponde a la máxima temperatura que pueden alcanzar estos, porque toda la energía química liberada de la reacción es utilizada en aumentar la temperatura de los gases, sin pérdidas al exterior. Esta es conocida como **temperatura de llama adiabática, y es el máximo teórico que se puede alcanzar para una determinada mezcla.**

3.2. Combustión superadiabática

Los procesos de combustión en un medio poroso inerte difieren en varios aspectos de los procesos de llama libre, como se señaló en la introducción de este trabajo. La principal diferencia, y es la que da origen a todas las otras, es que el frente de reacción o de combustión, es decir, la zona donde se transforman los productos en reactantes, está sumergido en la matriz sólida. Este frente de combustión tiene la particularidad de que, debido a que generalmente el largo del reactor es mucho mayor que el largo del frente (este es del orden de 1 centímetro de longitud), el frente de combustión puede viajar a lo largo del reactor. En qué dirección y con qué velocidad viaje el frente de combustión, o si este se mantiene en una ubicación, depende de varios parámetros, tanto de la matriz sólida como de la mezcla de gas que se vaya a utilizar, y tiene efectos sobre las temperaturas que se alcanzan en el proceso de combustión.

Pensemos en un reactor lineal, con una entrada de aire y combustible por un lado, y la salida de los gases de combustión por el otro lado, como el que se presentó en la introducción, en

la fig. 1.1. En este caso, el flujo viaja hacia arriba: los reactantes entran por la parte inferior del reactor, y los productos salen por la parte superior. Existen cuatro posibilidades de lo que puede ocurrir con el frente de combustión:

1. **Extinción:** la llama se apaga, no es posible sostener el proceso de combustión y ya no existe una zona de reacción. El aire y el combustible no reaccionan y no existe liberación de energía.
2. **Estabilización:** el frente se mantiene en una misma zona, sin moverse. El proceso alcanza un estado estacionario.
3. **Flashback:** la llama viaja aguas arriba, en contra del flujo (en la imagen, esto corresponde al frente moviéndose hacia abajo), hasta llegar a la entrada de gas y combustible. Esto es una situación peligrosa, pues la llama podría propagarse por las líneas de combustible y provocar una explosión.
4. **Blow-out:** la llama viaja aguas abajo, en la misma dirección del flujo. Cuando esta llegue al final del reactor, se escapará del medio poroso, y se apagará, debido a que ya no tiene la matriz sólida para estabilizarla.

Para entender cómo se comporta la llama, y en qué dirección viajará, es necesario comprender otros conceptos en primer lugar. En un estudio por Babkin, Korzhavin y Bunev [4], se proponen 5 regimenes de combustión en estado estacionario para combustión de gases en medio poroso:

1. **Low velocities (LVR):** Régimen de baja velocidad, $0 - 10^{-4} \text{ m/s}$, calor se transfiere principalmente por conducción, gran intercambio de calor entre fases.
2. **High velocities (HVR):** Régimen de alta velocidad, $0.1 - 10 \text{ m/s}$, calor se transfiere por convección gaseosa, presión uniforme.
3. **Sound velocity:** Velocidad del sonido, $100 - 300 \text{ m/s}$, calor se transfiere por convección gaseosa debido a gradientes de presión en la onda de combustión.
4. **Low-velocity detonation:** Detonación de baja velocidad, $500 - 1000 \text{ m/s}$, auto-ignición por la interacción de las ondas de choque con elementos de la carcasa.
5. **Normal detonation:** Detonación normal, $1500 - 2000 \text{ m/s}$, detonación por calor.

Para este caso, nos interesa únicamente el régimen de baja velocidad (LVR), pues a estas velocidades del frente de combustión se presenta un fuerte intercambio de calor entre la fase gaseosa y sólida, que es lo que permite la recirculación de calor y estabilización de la llama. Ahora que está caracterizado el tipo de llama con el que se trabaja, es posible explicar los conceptos que producen el movimiento del frente de combustión.

La **velocidad de llama laminar** S_L es un parámetro que indica la reactividad de una llama laminar, o con qué velocidad puede propagarse en el espacio, y depende tanto de la composición del combustible, relación de equivalencia de la temperatura y presión de los reactantes. No es un parámetro que se pueda medir directamente, y debe ser derivado de otras mediciones en base a modelos y supuestos [28]. Este parametro es usado para todo tipo de llamas, y no es lo mismo que la **velocidad del frente de combustión** u_{FC} en un reactor de MPI. Esta se apega más a la definición clásica de velocidad, y se calcula como la distancia que viaja el frente de combustión en un determinado tiempo. Podrían existir discrepancias para definir donde se ubica el frente de combustión, por ejemplo, si es la zona donde ocurre la reacción química y la fracción molar de reactantes cae abruptamente a cero, o el punto con máxima temperatura. Para este trabajo, se considera este último, el punto de mayor temperatura dentro del reactor, como la ubicación del frente de combustión, y en base a eso, se calculará su velocidad. Se define $u_{FC} > 0$ cuando el frente de combustión viaja aguas abajo, en la misma dirección del flujo, y $u_{FC} < 0$ cuando viaja aguas arriba. Además, también juega un rol importante la **velocidad de flujo o de filtración** u , la velocidad a la que se mueven los gases al interior del reactor, que a diferencia de una tubería o reactor convencional, en uno con medio poroso también se ve afectada por la porosidad del sólido, que disminuye el área transversal por la que puede avanzar el gas.

Al interior del reactor, el frente de combustión se estabilizará en la zona donde la velocidad del flujo y la velocidad de llama laminar sean iguales. La velocidad del flujo depende de la porosidad, que se considera constante a lo largo del reactor, y del caudal de premezcla, que se fija a la entrada del reactor. La velocidad de llama depende de más parámetros, pero el que es de importancia para este caso es el grado de reacción. Gracias a la recirculación de calor a través del MPI, la temperatura de los reactantes aumenta, lo que eleva el grado de reacción y aumenta la velocidad de llama laminar. Esto a su vez depende de la ubicación del frente de combustión: si se tienen dos frentes, en distintas ubicaciones, el que está más cerca de la salida, es decir, aguas abajo, tiene una menor cantidad de sólido por delante, y una mayor cantidad hacia atrás, lo que permitirá precalentar en mayor medida los reactantes, y así aumentar el grado de reacción y la velocidad de llama laminar. Por el contrario, el

frente que se encuentra más cerca de la entrada, “perderá” calor en el sólido aguas abajo, disminuyendo la energía que se entrega a los reactantes, el grado de reacción y la velocidad de llama laminar. Con esto en mente, ya es posible empezar a hablar del movimiento del frente de combustión. Como se señaló, este depende de la relación entre la velocidad de llama laminar S_L y la de flujo u , y se tienen tres posibilidades:

1. $S_L = u$: el frente se estabiliza, $u_{FC} = 0$.
2. $S_L > u$: la velocidad de llama laminar debe disminuir, por lo que viajará aguas arriba para disminuir el grado de reacción e igualar la velocidad del flujo, $u_{FC} < 0$.
3. $S_L < u$: el frente de combustión viajará aguas abajo, para aumentar su grado de reacción y que la velocidad de llama laminar se acerque a la del flujo, $u_{FC} > 0$.

Estos movimientos del frente de combustión pueden ser momentáneos, hasta que alcance una zona donde $S_L = u$ y este se estabilice, aunque también podría darse el caso de que la diferencia entre las velocidades sea tan grandes, que S_L no logre aumentar o disminuir lo suficiente para alcanzar a u en el largo del reactor, produciéndose un *blow-out* o *flashback*, según sea el caso.

Aquí aparecen los conceptos de **combustión superadiabática** y **subadiabática**. Un proceso de combustión es adiabático si no existen pérdidas de calor al ambiente. Esto permite alcanzar la máxima temperatura de llama posible, pues todo el calor generado por la reacción química se transforma en energía sensible de los gases. La temperatura de llama adiabática es el máximo teórico que puede alcanzar una llama libre, pues para esto debe estar perfectamente aislada. En la realidad, esto no es replicable, y todos los procesos de combustión son subadiabáticos, es decir, alcanzan temperaturas menores. El concepto de combustión superadiabática es más interesante, pues significa alcanzar temperaturas más altas que la máxima teórica.

Para una llama libre, esto no es posible, pues no tiene de donde obtener energía adicional para superar la temperatura adiabática. Para una llama confinada en un medio poroso, esto no es un problema, y puede alcanzar temperaturas superiores a la de llama adiabática. No es que se esté generando energía adicional de la nada o violándose la ley de conservación de la energía: es gracias a la recirculación de calor característica de los reactores de MPI. La temperatura máxima alcanzada depende de la composición de la mezcla aire-combustible, pero también depende de la temperatura de esta, mientras que la energía liberada por el proceso

de combustión depende únicamente de la composición de la mezcla, pues es la energía almacenada en los enlaces químicos de las moléculas que se transformarán en los productos. Esta energía se adiciona a la energía sensible que trae la premezcla, por lo que, si la premezcla está más caliente, a pesar de liberar la misma cantidad de energía en el proceso de combustión, alcanzará una mayor temperatura final, comienza desde un punto más alto. En una llama libre, la premezcla ingresa al sistema con su temperatura inicial, y a esa misma temperatura ingresará a la zona de combustión, mientras que en un reactor de MPI, los reactantes llegan a la zona de combustión a una temperatura más alta que la que tenían a la entrada del reactor, por lo que su temperatura final podrá ser más alta que la máxima teórica que correspondía para las condiciones de entrada.

En varios estudios, ha sido demostrado que, en un reactor de MPI, **cuando el frente de combustión viaja aguas abajo, es posible alcanzar la combustión superadiabática.** Esto se debe a que, cuando el frente se desplaza aguas abajo, disminuye la cantidad de sólido que tiene delante, lo que aumenta la zona de precalentamiento, permitiendo que la premezcla llegue a la zona de combustión a una mayor temperatura y se alcancen temperaturas superadiabáticas. El caso contrario ocurre **cuando el frente de combustión viaja aguas arriba: el proceso de combustión será subadiabático**, debido a que disminuirá progresivamente la zona donde se pueden precalentar los gases. Es importante señalar que el hecho de que sea un proceso subadiabático no es algo negativo: todos los procesos de combustión reales son subadiabáticos, por lo que si el frente de combustión viaja aguas arriba, esto sigue representando ventajas frente a un proceso de combustión convencional.

Independiente de la dirección de viaje del frente de combustión, la temperatura de llama podría ser menor a la adiabática, debido a las pérdidas de calor del reactor. Estas pérdidas pueden ser bien por problemas de aislación del reactor, o bien una salida de calor para ser utilizada en otro lado. La idea de los procesos de combustión no es solamente alcanzar altas temperaturas, sino poder utilizar ese calor en algo útil, como producción de potencia o calefacción. Por ejemplo, en la fig. 1.6 se presentó un quemador con una tubería en el centro, por el que pasa un fluido a calentar. En este caso, el quemador de MPI está “perdiendo” calor hacia ese fluido, pero ese es realmente el objetivo del proceso, calentar el fluido. Así, aunque se presenten salidas de calor del reactor y este no alcance temperaturas superadiabáticas, esto no es necesariamente negativo, y por el contrario, puede ser el fin del proceso.

Alcanzar una combustión superadiabática o subadiabática depende del movimiento del frente de combustión, lo que a su vez depende de la relación entre la velocidad de llama laminar y

la velocidad de flujo. Estas a su vez dependen de varios parámetros físicos, tanto del reactor como de la mezcla a combustionar. Controlar esto a través de las características del reactor no es lo más conveniente; habría que realizar modificaciones en este una vez que ya está instalado, lo que no es muy práctico. Así, lo más conveniente es centrarse en la premezcla de aire-combustible si se quiere controlar el comportamiento del frente de combustión. **Los dos parámetros más importantes son el flujo volumétrico total \dot{V} y la relación de equivalencia ϕ .** Ambos son fáciles de modificar: solo dependen del flujo de aire y de combustible.

El flujo volumétrico total \dot{V} es directamente proporcional a la velocidad de filtración u . Si aumenta \dot{V} , aumenta u , lo que significa que la velocidad de llama laminar S_L deberá aumentar también, por lo que el frente de combustión se moverá aguas abajo. En el caso contrario, si disminuye \dot{V} , el frente se moverá aguas arriba. En el caso de la relación de equivalencia ϕ , si esta aumenta, aumenta la proporción de combustible y el contenido energético de la mezcla. Esto produce un aumento en el grado de reacción, lo que aumentará S_L . Esto llevará a que el frente de combustión viaje aguas arriba, para disminuir el valor de S_L y equipararlo al de u . Para un menor ϕ , disminuirá el grado de reacción, desplazando el frente de combustión aguas abajo.

La combustión superadiabática parece muy atractiva para las aplicaciones de combustión: pueden alcanzarse temperaturas más altas de las obtenidas normalmente, lo que significa un mejor desempeño térmico o un ahorro en el uso de combustible. Sin embargo, esta presenta una desventaja crítica: cuando el frente de combustión viaja aguas abajo, eventualmente llegará al final del reactor, y se producirá un *blow-out*, extinguiendo la llama. Es por esto, que la gran mayoría de reactores de MPI buscan estabilizar el frente de combustión, $u_{FC} = 0$, y operar de forma estacionaria y continua.

Existen diversas técnicas para estabilizar el frente. La primera, utilizando lo que ya se ha presentado, **es ajustar \dot{V} y ϕ , de tal forma que el frente quede estabilizado dentro del reactor.** Sin embargo, si se produjera un cambio en los flujos de entrada, por ejemplo, por interrupciones o inestabilidades en el suministro de aire o combustible, estos parámetros se verían alterados y puede producirse un desplazamiento indeseado del frente de combustión. Otra técnica consiste en **utilizar dos capas de medio poroso con distinta porosidad**, lo que permitirá estabilizar el frente de combustión en la interfaz entre estas dos capas. Para entender esto, es necesario introducir el **número modificado de Péclet Pe** . Este es un

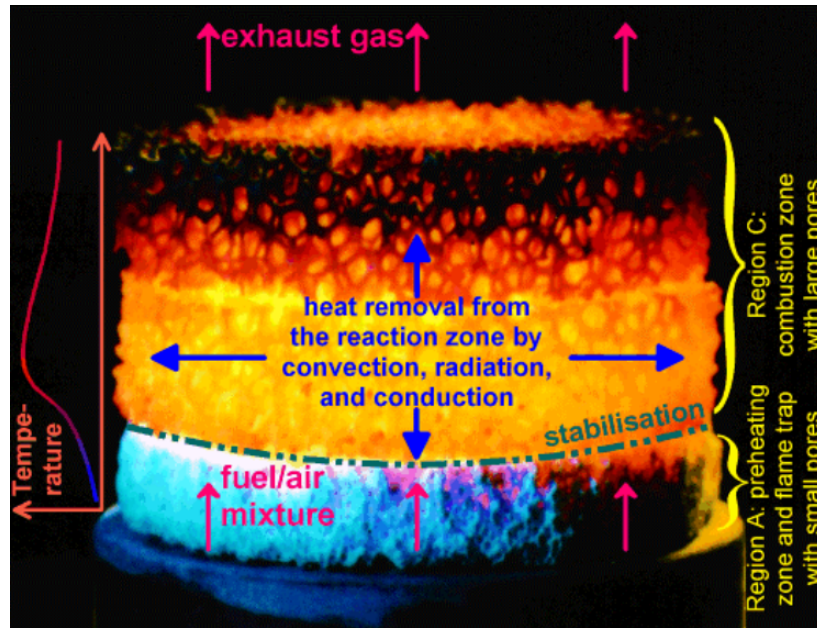


Figura 3.1: Esquema de un reactor de MPI con dos regiones con distintos tamaños de poro [33]

número adimensional definido como

$$Pe = \frac{S_L d_m C_p \rho}{k} \quad (3.8)$$

donde C_p , ρ y k representan el calor específico, la densidad y la conductividad térmica de la mezcla gaseosa, y d_m el diámetro equivalente de poro. Para este último, Lyamin y Pianev (1986) señalan que no es recomendable usar el diámetro hidráulico en procesos de combustión, y proponen que para un lecho de esferas, puede calcularse como

$$d_m \approx \frac{\delta}{2.77} \quad (3.9)$$

donde δ corresponde al diámetro de las esferas que componen el MPI [32].

Trimis y Durst (1996) [42] determinaron que existe un límite en el número de Péclet para la propagación del frente de combustión

$$Pe \geq 65. \quad (3.10)$$

En las zonas en que se cumpla esta condición, podrá propagarse la llama y formarse el frente de combustión, mientras que donde $Pe < 65$, no existirá combustión. Para el caso particular del hidrógeno, Dillon determinó que el límite baja a $Pe \geq 37$ [14].

Esto abre la posibilidad de utilizar capas con distintos tamaños de poro para estabilizar el frente: el frente puede moverse por la zona con poros grandes, pero no puede propagarse hacia la zona con poros pequeños, lo que permite estabilizar el frente de combustión entre ambas zonas. Un esquema de este método se presenta en la fig. 3.1 (Mößbauer et al. 2001). Este método ha sido ampliamente utilizado, para estabilizar el frente de combustión justo en la interfaz, pero también como medida de seguridad, para evitar la propagación de la llama hacia las líneas de suministro.

Una alternativa novedosa para la estabilización de frentes de combustión, consiste en el uso de **reactores de MPI divergentes**. Estos tienen primero una sección recta, con área transversal constante, y después se abren, aumentando gradualmente esta área. Para un mismo flujo \dot{V} de premezcla, un aumento del área transversal significa una disminución de la velocidad u . En un reactor con área constante, cuando el frente de combustión se desplaza aguas abajo para aumentar S_L , podría ocurrir que esta no logre alcanzar el valor de u , y ocurra un *blow-out*. En un reactor divergente, a medida que el frente viaja aguas abajo, se ensancha el área transversal y disminuye u , facilitando que S_L pueda alcanzar ese valor, y se estabilice el frente en lugar de escaparse del reactor. Excelentes resultados se han alcanzado con este método, como Liu et al. (2023), que lograron extender los límites de blow-out en un 300% respecto a un reactor recto [31], o Muñoz Herrera et al. (2024) que estabilizaron llamas de metano e hidrógeno con hasta 30% de H_2 [34], un gran avance en relación a estudios anteriores, donde se presentaba flashback con adiciones de 20 a 25% de H_2 .

3.3. Modelo matemático para combustión en MPI

El fenómeno de combustión en MPI es gobernado por las ecuaciones de conservación y transporte. A continuación, se presentarán las ecuaciones que modelan este fenómeno, junto con la explicación de los términos que las componen y los supuestos o simplificaciones utilizados en el modelo.

Se consideran el aire y combustible como un gas ideal, por lo que la densidad de la mezcla puede ser calculada mediante la **ecuación de estado de gas ideal**:

$$p/\rho_g = RT_g \tag{3.11}$$

donde p [Pa] corresponde a la presión, ρ_g [kg/m³] a la densidad del gas, R [J/kgK] es la

constante del gas y T_g [K] la temperatura del gas. De aquí en adelante, el subíndice g será utilizado para señalar propiedades del gas, mientras que el subíndice s es para la fase sólida. La siguiente ecuación es la de **conservación de masa**. Para un medio poroso, esta se escribe como:

$$\frac{\partial \epsilon \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon \rho_g \vec{u}) = 0 \quad (3.12)$$

donde ϵ [-] corresponde a la porosidad, \vec{u} [m/s] es el vector de velocidad del gas. Debido a que la densidad será calculada en base a la ley de gas ideal, y considerando una porosidad constante dentro del reactor, la ecuación de conservación de masa se reduce a

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0. \quad (3.13)$$

A continuación, la ecuación de **conservación de momentum**

$$\rho_g \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (3.14)$$

donde se ha despreciado el efecto de la fuerza gravitatoria y otras fuerzas de cuerpo, y se considera el fluido como uno newtoniano. El segundo término del lado derecho corresponde al tensor de esfuerzos para un fluido newtoniano, y μ [Pa·s] corresponde a la viscosidad dinámica del gas.

La ecuación de **conservación de especie química**

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla w = \frac{1}{\rho_g} \nabla \cdot (D \rho_g \nabla w) - K \cdot w \cdot e^{-Ea/R_u T_g} \quad (3.15)$$

donde w corresponde a la fracción másica de cada especie química involucrada en la reacción. En el primer término del lado derecho, D [m²/s] corresponde a la difusión másica. Para esta, se asume que el número de Lewis Le , definido como el cociente entre la difusividad térmica y másica, es igual a 1. El segundo término del lado derecho es el más importante de la ecuación, pues corresponde a la velocidad de reacción, es decir, representa el consumo o generación de la especie química. La reacción se asume de tipo Arrhenius de un paso y de primer orden, obteniéndose la forma exponencial que aparece en la ecuación, donde K [1/s] es el factor de frecuencia de choques, Ea [J/mol] es la energía de activación para la reacción, y R_u [J/molK] es la constante universal de los gases.

Para la energía, se considera un modelo de no-equilibrio de temperaturas, es decir, se tienen dos ecuaciones de energía por separado, una para la fase sólida y otra para la fase gaseosa.

La ecuación de **conservación de energía para el gas** es

$$\epsilon(\rho C_p)_g \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T_g \right) = \nabla(\epsilon \lambda_g \nabla T_g) - a(T_g - T_s) + \Delta h_c \cdot K \cdot w \cdot \epsilon \cdot \rho_g \cdot e^{-E/RT_g}. \quad (3.16)$$

En el lado izquierdo, C_p [J/kgK] es el calor específico a presión constante, mientras que en el lado derecho, en el término difusivo, λ_g [$W/m \cdot K$] es la conductividad térmica del gas. El segundo término representa el intercambio de calor entre el sólido y el gas, donde a [W/m^3K] representa el coeficiente de transferencia de calor en la interfase sólido-gas. El tercer término corresponde a la producción de energía debido al consumo de combustible, donde Δh_c [J/kg] es la energía de combustión.

A continuación, se introduce la ecuación de **conservación de energía para el sólido**

$$(1 - \epsilon)(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla(\lambda_{ef} \nabla T_s) + a(T_g - T_s) \quad (3.17)$$

donde λ_{ef} es la conductividad térmica efectiva del sólido, que considera efectos de conducción y de radiación. También está presente el término de intercambio de calor entre el sólido y gas, pero con el signo opuesto al presentado en la ecuación anterior.

Todas estas ecuaciones corresponden al modelo de combustión en MPI. Se presentan todas las ecuaciones, buscando entender el proceso de combustión no solo desde los resultados, si no también de la física y matemática que modela el problema, sin embargo, **en este trabajo no se resolverán las ecuaciones de conservación de especie química ni energía**. Esto es porque el estudio computacional que se realizará, no modelará un proceso de combustión con reacción química, si no que buscará explicar el comportamiento del frente de combustión en un codo desde la hidrodinámica, utilizando las ecuaciones de conservación de masa (ec. 3.12) y de momentum (ec. 3.14).

Otra componente importante del modelo matemático, son las pérdidas de calor que pueda experimentar el proceso de combustión. Si bien las ecuaciones 3.11-3.17 no presentan parámetros geométricos ni se menciona un dominio sobre el que se apliquen estas ecuaciones, es claro que un proceso real, debe ocurrir en un determinado espacio físico, bien delimitado. Para dar la estructura a la fase sólida, y mantener confinado el gas, los procesos ocurren en reactores o quemadores. Estos tienen paredes, que están en contacto con los alrededores. Es a través de estas paredes que ocurren pérdidas de calor desde el proceso de combustión hacia

el ambiente, modeladas según la siguiente ecuación

$$\dot{Q}_{loss} = A \cdot h \cdot (T_w - T_0) + A \cdot \epsilon' \cdot \epsilon'' \cdot \sigma \cdot (T_w^4 - T_0^4) \quad (3.18)$$

donde \dot{Q}_{loss} [W] es el flujo de calor al ambiente, A [m^2] corresponde al área superficial externa del reactor, h [W/m^2K] es el coeficiente de convección natural, T_w y T_0 [K] las temperaturas de la pared y ambiente, respectivamente, ϵ' [–] es la emisividad de las esferas de alúmina, ϵ'' [–] la transmisividad de la pared del reactor, y σ [W/m^2K^4] es la constante de Stefan-Boltzmann. En el lado derecho, el primer término representa las pérdidas por convección sólido-gas, mientras que el segundo modela las pérdidas de energía mediante radiación.

Capítulo 4

Diseño del reactor

4.1. Reactores de flujo recíproco

Como se señaló anteriormente, la combustión superadiabática es una idea interesante para alcanzar temperaturas más altas con menor consumo de combustible, pero tiene la desventaja de que, para alcanzarla, es necesario que el frente de combustión viaje aguas abajo, lo que hará que eventualmente este alcance el final del reactor, se produzca un *blow-out* y se apague la llama. Afortunadamente, existe una tecnología que permite aprovechar al máximo este fenómeno, eliminando su limitación: los **reactores de flujo recíproco**, o RFB, por sus siglas en inglés *reciprocal flow burner*.

En un reactor convencional, existe una entrada y una salida, y el flujo tiene una dirección fija. En un RFB, el flujo viajará en ambas direcciones, la entrada también actuará como salida y viceversa. Para entender esto, se puede observar la fig. 4.1. El funcionamiento del reactor se divide en dos etapas o semi-ciclos, cada uno señalado con flechas de distinto color (rojas o azules). Para el primer semi-ciclo, con flechas azules, la premezcla de aire-combustible entra por la válvula de la izquierda, pasa a través del reactor y salen los gases de escape por la válvula derecha. Cuando se hace el cambio de semi-ciclo, las válvulas cambian de dirección, y el flujo viaja de derecha a izquierda, siguiendo las flechas rojas.

Si en el semi-ciclo 1, el frente de combustión comenzara a viajar aguas abajo (de izq. a der.), se podría alcanzar una combustión superadiabática. Cuando este se acerque al final del reactor, en lugar de escapar de este, como ocurriría en un reactor convencional, se puede realizar el cambio de válvulas y dar lugar al semi-ciclo 2. Ahora, la premezcla entrará por el lado

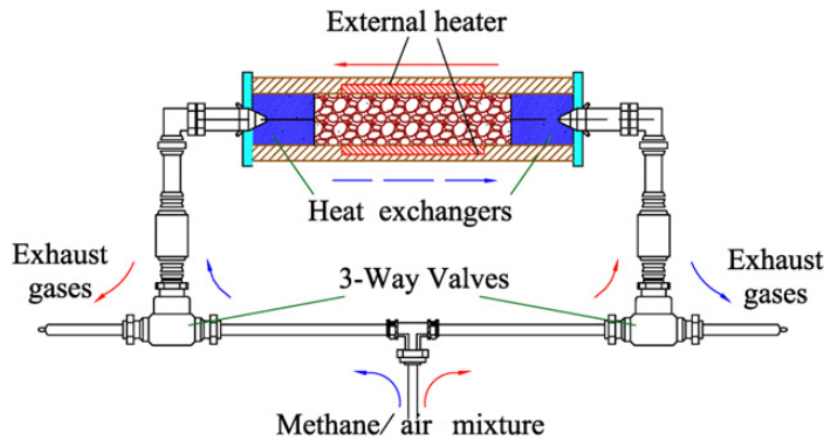


Figura 4.1: Esquema de un reactor de flujo recíproco [45]

derecho, y el flujo viajará en sentido contrario al interior del reactor. Si los parámetros de entrada \dot{V} y ϕ son los mismos que en el semi-ciclo anterior, entonces el frente de combustión debería viajar nuevamente aguas abajo, solo que ahora, “aguas abajo” va en la otra dirección, de derecha a izquierda. Así, el frente se desplazará hasta acercarse a la salida, en este caso la válvula izquierda, y se procederá a realizar nuevamente el cambio de válvulas, volviendo al semi-ciclo 1, repitiendo el proceso. Si bien el frente de combustión estará cambiando su dirección de movimiento constantemente, siempre se mantendrá viajando aguas abajo, que es lo que se requiere para alcanzar las altas temperaturas de una combustión superadiabática.

En un reactor convencional, la temperatura alcanza un máximo en la zona donde se encuentra la llama, mientras que en este, debido a que la llama estará constantemente moviéndose a lo largo del reactor, se forman dos máximos, que dan lugar a un perfil de temperatura con forma de meseta como el que se observa en la fig. 4.2 (Hoffmann et al. 1997). Estos quemadores han dado lugar a multitud de estudios, tanto experimentales como numéricos, entregando excelentes resultados. En el estudio experimental de Hoffmann et al. [23], se logró combustionar mezclas ultra pobres con una relación de equivalencia tan baja como $\phi = 0.026$, con emisiones de NO_x y CO muy bajas. En el estudio computacional de Henríquez-Vargas, Valeria y Bubnovich (2015), se compara el desempeño de un reactor convencional con un RFB, con dos medios porosos distintos en cada caso, mostrando una clara ventaja del RFB: las relaciones de equivalencia más bajas alcanzadas en el reactor convencional fueron de 0.05 y 0.044 para espuma y esferas de alúmina, respectivamente, mientras que en el RFB, para los mismos medios, se obtuvieron ϕ_{min} de 0.021 y 0.016 [21].

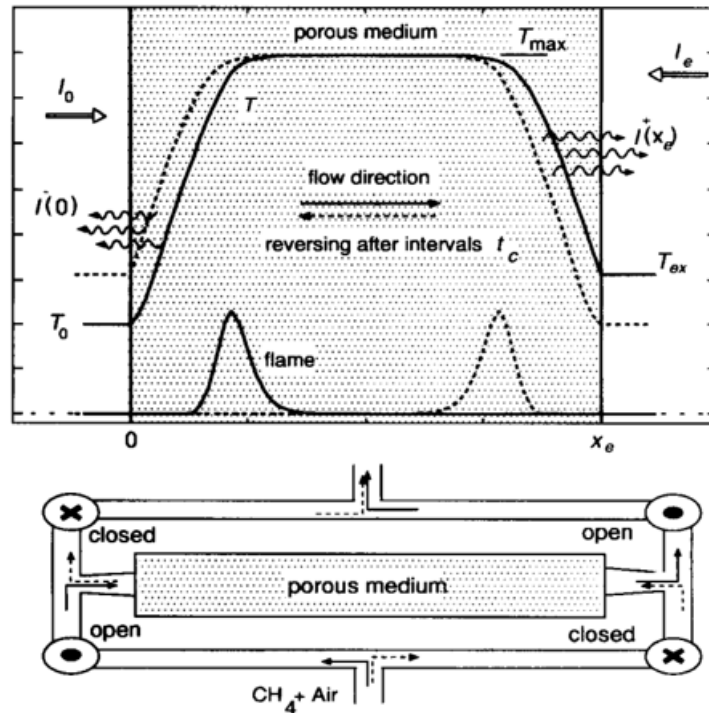


Figura 4.2: Perfil de temperatura en un RFB [23]

4.2. Nuevo diseño de reactor

Se busca diseñar un reactor de MPI que pueda aprovechar al máximo la recirculación de calor y el fenómeno de combustión superadiabática, de tal forma que puedan alcanzarse altas temperaturas con mezclas muy pobres en combustible o con un contenido energético muy bajo. Como se señaló en la sección anterior, los reactores recíprocos representan un gran avance en esta dirección, pues alternar las salidas y entradas permite que el frente de combustión viaje siempre aguas abajo y se alcanza una combustión superadiabática. Sin embargo, en el instante en que se realiza el cambio de válvulas, aparece un problema, u oportunidad de mejora: el combustible que estaba entrando por la válvula abierta, que estaba aguas arriba del frente de combustión, una vez que se hace el cambio, pasa a estar aguas abajo del frente de combustión, y ahora, el flujo, que viene desde el otro lado, empujará este combustible hacia la salida (por el mismo lado en que entró, antes del cambio de válvulas). Esto provocará que este combustible, que no alcanzó el frente de combustión, y por lo tanto no pudo reaccionar, sea expulsado a la atmósfera, pudiendo aumentar momentáneamente las emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero del proceso, en función del combustible que se esté utilizando.

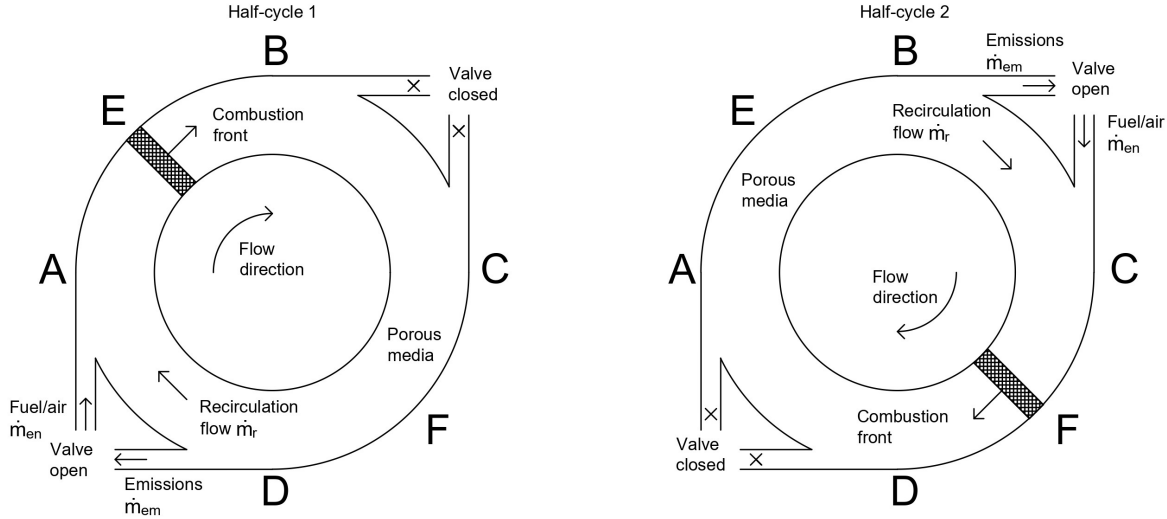


Figura 4.3: Diagrama del nuevo modelo de reactor propuesto

Así, la idea propuesta para optimizar la combustión es la creación de un reactor recíprocante, manteniendo el concepto de alternar las entradas y salidas, pero con la novedad de una forma circular, en lugar de ser un tubo recto. Al igual que en los reactores recíprocantes ya existentes, en este se busca mantener el frente de combustión siempre viajando aguas abajo, con la ventaja de que en un reactor circular, esto podría alcanzarse sin la necesidad de cambiar la dirección del frente de combustión: este se mantendrá siempre avanzando en el mismo sentido (por ejemplo, en el sentido de las agujas del reloj).

En la figura 4.3 se observa un diagrama del funcionamiento del reactor. La imagen se divide en dos semi-ciclos, que son los de funcionamiento del reactor, en base al par de válvulas que están activas. Para el semi-ciclo 1 (lado izquierdo, *half-cycle 1*), las válvulas abiertas están en la esquina inferior izquierda del dibujo: por el punto A ingresa la premezcla aire combustible, y los gases de combustión salen por el punto D. Se realiza el encendido en el punto E, y el frente de combustión y el flujo viajan en sentido horario, hasta llegar al punto F (notar que las válvulas en los puntos B y C están cerradas, por lo que el flujo no puede escapar por ahí). Una vez que esté en el punto F, se realiza el cambio de válvulas, y se pasa al semi-ciclo 2 (lado derecho, *half-cycle 2*). En este, la mezcla reactiva ingresa tangencialmente por el punto C, y los gases de escape salen por el punto B, mientras que las válvulas en el punto A y D están cerradas. Esta situación es la misma que se tenía al inicio del semi-ciclo 1: el frente de combustión está aguas abajo de la entrada, y el frente de combustión y el flujo

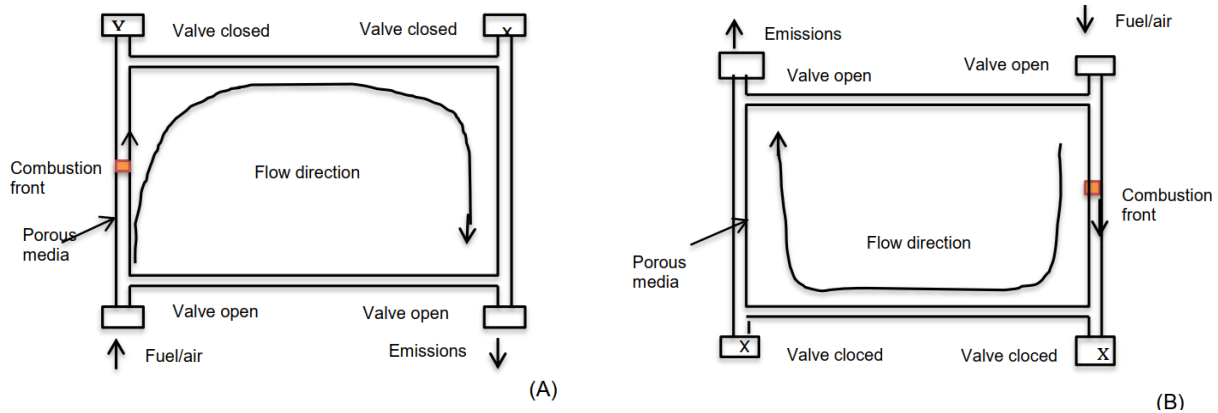


Figura 4.4: Diseño alternativo para el reactor

viajarán en sentido horario, hasta llegar al punto E, donde se habrá completado un ciclo, y se realizará nuevamente el cambio de válvulas. Así, el frente de combustión siempre viajará aguas abajo, alcanzando una combustión superadiabática, y moviéndose de forma continua en sentido horario, disminuyendo los problemas de emisiones ya mencionados que podría traer un reactor recíprocante clásico.

Otra diferencia importante de este reactor, es que su forma circular abre la posibilidad de la recirculación de flujo. Como se puede ver en ambos semi-ciclos de la fig. 4.3, existen 3 flujos: El flujo de entrada \dot{m}_{en} , el flujo de salida o de emisiones \dot{m}_{em} , y el flujo de recirculación \dot{m}_r . Estos dos últimos están compuestos de productos de combustión, con la diferencia de que las emisiones salen del reactor, hacia la atmósfera, mientras que el flujo de recirculación, tal como su nombre lo indica, vuelve al reactor, uniéndose al flujo de aire y combustible entrante, para dirigirse a la zona de combustión. El efecto de esta recirculación debe ser estudiado, pero se espera que, al mezclarse con los reactantes, puedan entregarles a esto energía térmica adicional a la que se recircula mediante la fase sólida, maximizando la energía que se obtiene de los gases producto. También está la posibilidad de que ocurra el efecto inverso: que los gases de recirculación no entreguen energía adicional a los reactantes, y que además los diluyan, reduciendo el contenido energético de la mezcla que se dirige al frente de combustión, lo que disminuiría los efectos positivos de la recirculación de calor a través del medio poroso, pudiendo incluso extinguir la llama.

En un principio, la idea de este reactor es maximizar la recirculación de calor, logrando alcanzar temperaturas más altas con mezclas ultra pobres, y minimizar las emisiones contaminantes. Este trabajo de título se enmarca en el **proyecto Fondecyt de Exploración 13240110**. Este es un proyecto de cuatro años, financiado por la Agencia Nacional de Investi-

gación y Desarrollo (ANID), que busca estudiar este nuevo diseño de reactor. El año 2025, en que se desarrolla este trabajo, corresponde al primer año del proyecto. Para este primer año, se comienzan a realizar simulaciones computacionales en una dimensión del reactor circular, para comprobar si es posible la gran recirculación de calor que se busca. Se pensó también en realizar un primer prototipo del reactor para realizar pruebas experimentales. Hasta ahora, se ha hablado del reactor circular, pero en un comienzo existían dos posibles diseños: el circular, presentado en la fig. 4.3, y uno cuadrado, como el que aparece en la fig. 4.4. Este último sigue el mismo principio de ciclos ya explicado, alternando las válvulas y con el frente de combustión viajando siempre en el mismo sentido, pero con secciones rectas en lugar de curvas. Si bien esta opción podría ser más sencilla de fabricar, existe la posibilidad de que se presenten problemas en la esquina del reactor, al ser un cambio repentino de la dirección en la que debe viajar la llama, por lo que se decidió proseguir con el diseño circular. Así, se comenzó el proceso de diseño del reactor, tomando en consideración aspectos relacionados a su funcionalidad, pero también al proceso de manufactura e instalación. En primer lugar, **¿cómo debe ser la sección transversal del reactor?** Esto no se refiere a la forma del reactor recién mencionada, si no a la que se obtendría al hacer un corte en algún punto del reactor, o en otras palabras, que “ve” el gas cuando atraviesa el reactor. Esta pregunta no es crítica, pues existen reactores con sección transversal redonda o cuadrada, pero se definió usar la opción circular. Después, es necesario **definir los diámetros, del reactor y de la sección transversal.** Si el diámetro del reactor es cercano al de la sección transversal, entonces no será posible fabricarlo, pues las entradas y salidas se cruzarían unas con otras, como se ve en el lado derecho de la fig. 4.5. Esto podría solucionarse usando un diámetro de reactor mayor, como el que se ve en el lado derecho de la misma figura, sin embargo, presenta un problema, particularmente importante para la etapa de estudio del reactor: al tener un mayor diámetro, el frente de combustión tiene que viajar una distancia mucho mayor. Si se quiere estudiar el comportamiento del reactor recíprocante, lo mínimo sería hacerlo en un ciclo completo, e idealmente en más de uno. En este caso, un ciclo tomaría mucho tiempo, lo que dificulta su estudio. Debe buscarse un diámetro que permita fabricar el reactor, sin hacerlo demasiado grande, para poder estudiarlo. La siguiente pregunta que surge es, **¿cómo instalar las entradas y salidas del reactor?** Debido a que este tipo de reactores en general no trabajan con altas presiones, sino a presión atmosférica, o levemente por encima de esta, es necesario que la salida sea grande, para asegurarse que los gases puedan escapar del reactor. Las entradas deben ser tangentes a la dirección del flujo, para mantener un flujo estable y que siga la dirección deseada, pero además, el gas de entrada debe distribuirse de forma uniforme a través del área transversal del reactor. Normalmente, en los reactores rectos, se

instala una pieza a la entrada, el difusor, que permite distribuir de forma uniforme el gas que viene de la línea de suministro. Para esto, la pieza debe ser del mismo tamaño que la sección transversal del reactor. En el caso del reactor circular, esto es un problema, porque si una entrada muy grande “chocaría” con la salida, como se señaló anteriormente. Una posibilidad, para evitar esto, sería instalar varias entradas más pequeñas, de forma simétrica, alrededor de la sección transversal del reactor. Esto permitiría instalar las entradas sin que obstruyan las salidas, pero aún debe definirse cuántas entradas se deberían instalar, de manera que conectarlas a las líneas de combustible no haga la instalación aún más complicada, y se debe determinar si esta configuración de varias entradas permite obtener un flujo uniforme a través del reactor. Otra alternativa para que las salidas y entradas no se entorpezcan entre sí, sería instalar las salidas fuera del plano de la vista que se presenta en las figuras 4.3 y 4.5, es decir, saliendo de la hoja, ya sea perpendicular o con una inclinación menor. Esto dejaría el plano del reactor libre para instalar la entrada de forma convencional, sin embargo, aparece también la interrogante de si es posible sacar los productos de combustión de esta forma, pues el flujo viene por el plano del reactor, y tendría que hacer un cambio de dirección, lo que se dificulta si, como se mencionó antes, el reactor no trabaja a una presión mucho mayor a la atmosférica. Además, si se quiere estudiar la recirculación del flujo, es necesario idear una forma para separar una porción de los productos de combustión, entre el flujo de salida, o emisiones, y el flujo de recirculación. **Se debe diseñar un sistema para encender el reactor.** Para reactores abiertos a la atmósfera, es posible realizar el encendido en la salida, por ejemplo, con un fósforo o un encendedor, y después esperar a que el frente de combustión se sumerja y estabilice en el medio poroso. Para este reactor, que es cerrado, no es posible hacerlo, y debe ser encendido en el interior. Se han visto dos opciones en otros reactores: la primera, consiste en instalar un chispero, dos contactos entre los que se genere un arco eléctrico que encienda la llama cuando el reactor esté lleno de gas; la segunda opción consiste en hacer una abertura en el reactor, para calentar con una fuente externa el medio poroso, como un soplete, y una vez que esté a alta temperatura, cerrar dicha abertura y permitir la entrada de gas, para que este encuentre el sólido a alta temperatura y se encienda. Una vez que se hayan resuelto estos problemas de diseño de la estructura del reactor, debe pensarse en lo que irá dentro del reactor, y cómo construirlo.

Para el interior del reactor, se debe **seleccionar qué medio poroso irá dentro del reactor**, espumas cerámicas o esferas. En caso de elegir la primera opción, debido a que las espumas son rígidas, se debe fabricar una espuma que tenga la forma del reactor, y además idear cómo instalarla dentro del reactor. Si el reactor se fabrica como una sola pieza, entonces

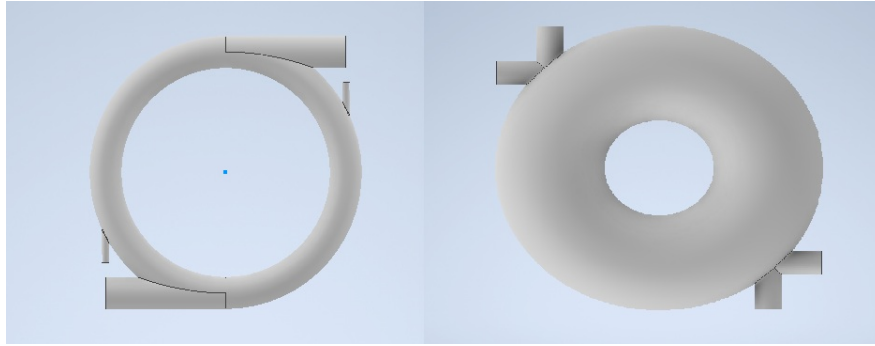


Figura 4.5: Dibujo de reactores con dos diametros distintos

no será posible poner la espuma dentro de este. Pareciera entonces una solución evidente usar las esferas, porque estas pueden ingresar al reactor por las entradas o salidas hasta que esté lleno, pero se debe tener cuidado de que no se caigan por entradas o salidas, lo que abre otra pregunta: **¿en qué orientación debe instalarse el reactor?** En las figuras presentadas, solo se ve una vista, pero esta podría corresponder tanto a la vista superior, es decir, el reactor está “acostado”, o una vista lateral, con el reactor “parado”. Esta decisión debe tomarse considerando cómo se piensan ubicar las salidas y entradas, y en caso de que se elijan esferas, como evitar que estas se caigan. Podría ser además un motivo interesante de estudio, si la fuerza de gravedad tiene algún efecto en el proceso. Para evitar pérdidas de calor muy grandes y poder estabilizar la llama, este debe tener una capa de aislante interior, entre la pared del reactor y el medio poroso, y aparece el mismo obstáculo que aparece para el uso de una esponja cerámica ¿cómo se instalará el aislante dentro del reactor, si es una superficie cerrada? Otra consideración es el **proceso de manufactura del reactor**. ¿Cómo se le dará la forma circular? Existen algunas opciones para esto. Tanto para una sección transversal circular o cuadrada, podría tomarse un perfil con esta forma y doblarlo. Si se decidiera por la forma cuadrada, podrían doblarse dos planchas, para darles la forma circular, y utilizarse como la pared interior y exterior del reactor, y utilizar dos discos planos como “tapas”. Una vez que se haya decidido como hacer la parte principal del reactor, hay que ver cómo instalar las salidas y entradas; una posibilidad es perforar el tubo y soldar los ductos de entrada y salida. Volviendo a la instalación del aislante y medio poroso al interior del reactor, podría ser beneficioso abrir el reactor para facilitar esto. Se propone la idea de, una vez fabricado el cuerpo principal del reactor, ya sea doblando un tubo o de otra forma, hacer un corte en la mitad de este, en el plano principal del reactor (para obtener dos piezas parecidas a lo que se ve en la fig. 4.3), instalar el aislante y medio poroso, para después soldarlo e instalar entradas y salidas.

El diseño del reactor es un proceso complejo. Se han nombrado varios factores a tener en cuenta, y lo que dificulta más el proceso, es que estos factores no son independientes entre sí; todas las decisiones de diseño deben ser tomadas como un conjunto para obtener un prototipo que sea posible de fabricar, operar y estudiar. Mientras se discutían todas las problemáticas y posibilidades para el diseño, surgió otra interrogante, tal vez más fundamental, y necesaria para llevar a cabo el proyecto, **¿cómo se propaga el frente de combustión en una curva?**

4.3. Definición del problema

Hasta este punto, se había supuesto que la llama se propagaría con una forma radial, como está representada en la fig. 4.3, pero esto no necesariamente sería así. **No se han encontrado investigaciones o estudios relacionados a la propagación de un frente de combustión en una curva, por lo que no se tiene claridad cómo se comporta este, o si es posible que exista uno.** Antes de pensar en desarrollar un prototipo de reactor circular, es necesario responder esta pregunta, y verificar si es posible que la llama se establezca y desplace a lo largo de una curva. Para centrarse en la investigación de este comportamiento, **se decide comenzar con el estudio de un reactor correspondiente a un cuarto de circunferencia o codo de 90°.** A pesar de no estar incluido en el cronograma original del proyecto, se determinó que este paso intermedio en el diseño del reactor era clave para su desarrollo, por lo que este trabajo se centrará en esta pregunta, dejando para etapas posteriores del proyecto el estudio de la recirculación de calor en el nuevo modelo de reactor recíprocante.

En la fig. 4.6, se presentan ejemplos de cómo podría propagarse el frente de combustión en una curva. En la imagen de la izquierda, este avanza de forma radial, que sería el análogo a la propagación lineal que se tiene en un reactor recto. Si el frente se propagase así, podría moverse continuamente alrededor del reactor circular, pero existe la posibilidad de que se mueva de otro modo. La imagen de la derecha muestra otro posible caso, en el que el frente de combustión avanza de forma recta, como si no existiera una curva. Estas son solo dos posibilidades, pero existen muchos otros comportamientos que el frente podría adoptar: podría avanzar linealmente, pero orientado horizontalmente en lugar de verticalmente; podría solo avanzar por la pared de menor radio (o la de radio mayor), sin ocupar toda la extensión del reactor; podría ocurrir algo completamente distinto en lo que no se ha pensado, o tal vez ni

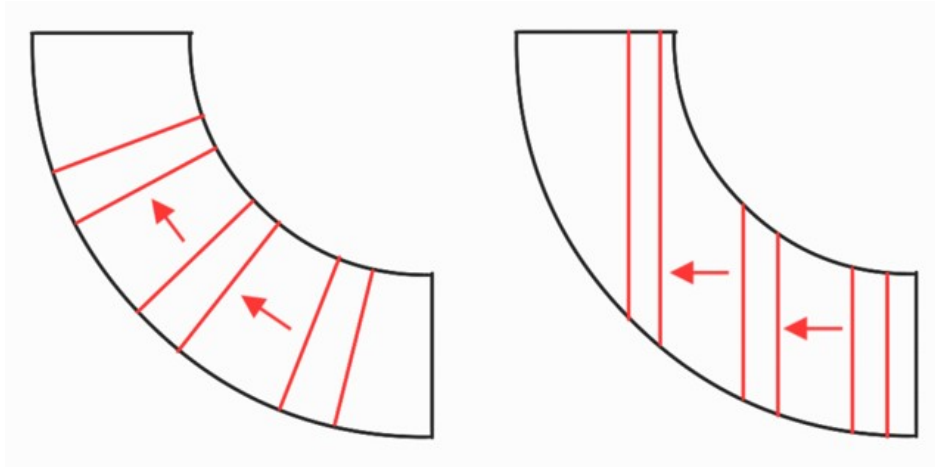


Figura 4.6: Posibles formas de propagación del frente de combustión en una curva

siquiera es posible formar un frente de combustión estable en un reactor curvo. No se tiene una idea clara de qué ocurrirá dentro del reactor, por lo que es necesario ser muy cuidadoso al analizar la información que se recopile, y no descartar ninguna posibilidad sin la evidencia necesaria.

Para el estudio, se combinarán el enfoque computacional, desarrollando un modelo en tres dimensiones que permita entender el comportamiento del flujo al interior del reactor, y el enfoque experimental, para lo que será necesario fabricar el reactor con forma de codo y realizar pruebas con este en laboratorio, obteniendo datos reales de la operación del reactor. Ambos métodos presentan ventajas, y es posible obtener lo mejor de ambos al combinarlos. El enfoque experimental permitirá determinar si el reactor puede o no funcionar, entregando datos reales de su comportamiento, como su desempeño térmico y las emisiones contaminantes. El enfoque computacional será utilizado para estudiar cómo se comporta el flujo al interior del reactor, influenciado por la curva y el medio poroso, sin proceso de combustión, buscando dar una explicación a los resultados que se obtengan en el enfoque experimental desde la hidrodinámica.

Una vez que se tenga claridad en el comportamiento de este reactor de un cuarto de circunferencia, será posible avanzar hacia el reactor circular completo propuesto en el proyecto de exploración.

Capítulo 5

Enfoque experimental

5.1. Instalación del reactor

Para la creación del reactor de medios porosos circular, es necesario primero estudiar cómo se comporta un frente de combustión frente a una curva. Por esto, se realiza el estudio experimental en un reactor curvo, correspondiente a un cuarto de circunferencia. Se decidió utilizar solo un cuarto y no la circunferencia completa, debido a que es más fácil de construir e implementar, y permitirá centrarse en el fenómeno que se busca estudiar en esta primera etapa del proyecto, que corresponde al comportamiento del frente de combustión frente a una curva, y no a la recirculación de calor en el reactor circular. Esto último será estudiado en la etapa final del proyecto, cuando se fabrique el prototipo del reactor completo.

Para la implementación, fue necesario fabricar el reactor curvo. Se seleccionó una tubería de acero simple al carbono, debido a su bajo costo, y que al trabajar con gas natural, no se requieren mayores precauciones, como sí ocurre cuando se trabaja con otros gases, como hidrógeno, que produce fragilización, o amoníaco, un gas corrosivo que puede dañar los materiales. El primer parámetro definido fue el radio de curvatura del reactor R_c , de 200 mm. De forma arbitraria se escogió un radio de curvatura que no diera origen a un reactor muy pequeño, en el que podría ser difícil observar diferencias en la forma del frente de combustión, ni a uno muy grande, en el que se requeriría más material y tomaría más tiempo para que el frente de combustión viaje por el reactor. La tubería escogida tiene un diámetro exterior de $1\frac{3}{4}$ in. (que corresponde a 44,45 mm), con un espesor de 2 mm, obteniéndose un diámetro interior de levemente superior a 40 mm. Estas medidas fueron seleccionadas por ser la opción comercialmente disponible que mejor se acercaba al diámetro interior deseado de 40 mm. Se



Figura 5.1: Tubería con un casquete en el laboratorio de Termofluidos.

busca esta medida, pues debe coincidir con el diámetro exterior de otra pieza, que se encontraba ya disponible en el laboratorio de termofluidos, procedente de otro reactor: el difusor, que permite distribuir el gas de manera uniforme dentro del reactor y va insertado dentro del tubo. Para obtener una tubería curva, se evaluaron diferentes alternativas. La primera opción fue utilizar un codo de 90° disponible comercialmente, pero no sería posible, pues la relación entre radio de curvatura y diámetro es muy alta; en este caso, es de 5, y en los codos ya fabricados, esta relación generalmente no supera 2. La segunda opción evaluada fue enviarlo a una maestranza para darle la forma requerida con una máquina dobladora de tubos; este proceso también depende de la relación radio/diámetro, por lo que las máquinas tendrían problemas para fabricarlo. La tercera opción fue finalmente la seleccionada, y consiste en un casquete: utilizar varias secciones rectas, con cortes en un determinado ángulo en ambos extremos, de tal forma que la vista lateral sea un trapecio, con un lado de la tubería menor y otro mayor, y al unirlos, permiten aproximar una curva, como se observa en la fig. 5.1. Para el reactor, se utilizaron 5 secciones, con un ángulo de 9° en cada lado, que después serían soldados entre si para formar el cuarto de circunferencia. Una vez soldados, con un taladro de pedestal, se realizan agujeros pasantes, de 5 mm de diámetro, en el centro de cada sección. Estos agujeros serán utilizados para insertar las varillas para termocupas. El siguiente paso consiste en instalar el aislante del reactor. La tubería de acero es recubierta por una capa interior de 3mm de espesor de aislante, y por dos capas exteriores, de 6mm de espesor cada

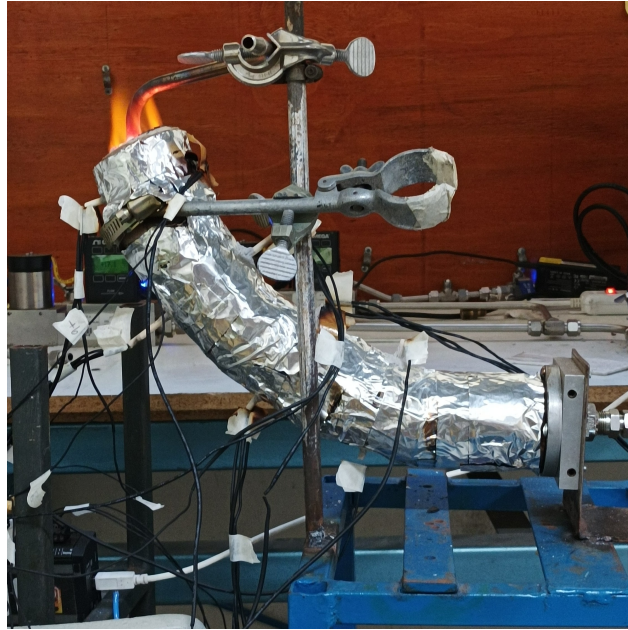


Figura 5.2: Reactor instalado y encendido

una, que luego serían perforadas para calzar con los agujeros de la tubería. Posteriormente se insertan las varillas y las termocupas en el reactor. En la fig. 5.2, se presenta el reactor instalado y recién encendido (la llama aún no se ha sumergido en el medio poroso).

Para las mediciones de temperatura, se utilizarán 10 termocupas tipo S, conectadas a un dispositivo de adquisición de datos Personal Daq56, del fabricante Iotech, que a su vez está conectado a un computador, para registrar las mediciones mediante el software Personal Daqview. Las termocupas se distribuyen en 3 grupos de 3 termocupas, y la última sola. Las 3 termocupas de cada grupo, se ubican en dirección radial, con una ubicada en la cara interior del tubo más cercana al centro de curvatura del reactor, otra en la cara interior más alejada del centro de curvatura, y la tercera justo entre estas dos, es decir, al centro del reactor. La distribución y nomenclatura que se utilizará para las termocupas se presenta en la fig. 5.3, señaladas en rojo. Las letras *i*, *c* y *e* corresponden a interior, central y exterior, respectivamente. Debido a lo delicadas que son, las termocupas se insertan en una varilla cerámica, que atraviesa el reactor, permitiendo sacar un extremo de la termocupa por cada lado. Esta distribución de termocupas permitirá determinar la forma en que se comporta el frente de combustión al interior del reactor: si para todos los grupos de termocupas (entendiéndose como grupo las 3 termocupas que están en la misma varilla, como 1i, 2c, 3e) tres coinciden al mismo tiempo en su temperatura máxima, es un indicador de que el frente

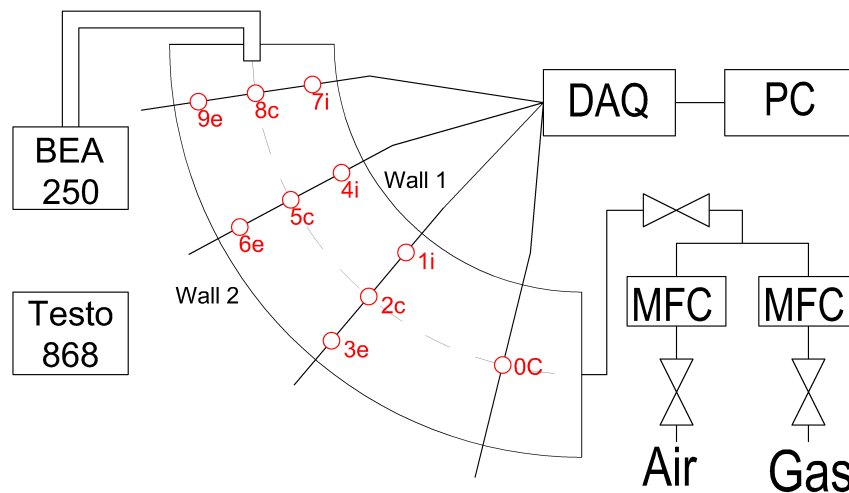


Figura 5.3: Diagrama de instalación experimental

de combustión viaja de forma radial; si por el contrario, las termocuplas de un mismo grupo alcanzan su temperatura máxima en diferentes instantes, esto podría indicar que el frente viaja de otra forma. Podrán calcularse distintas velocidades del frente de combustión para distintos radios: se espera que las velocidades en la línea 3e-6e-9e sean distintas a las de la línea 1i-4i-7i, por ejemplo. La termocupla que está sola, 0c, no ayudará a determinar la forma del frente de combustión, pues no tiene otras en la misma varilla para comparar, pero se utilizará como termocupla de seguridad, pues permite conocer la ubicación del frente de combustión, para evitar que este se acerque demasiado a la entrada de aire-combustible. Se selecciona este tipo de termocuplas debido a sus propiedades, que las hacen ideales para procesos de combustión: pueden operar hasta temperaturas de 1600°C de forma continua, y trabajan bien en ambientes oxidantes. En un principio, se intentó hacer una combinación de termocuplas tipo S y tipo K, puesto que de estas últimas, se tenían muchas disponibles. Al hacer el primer encendido o puesta en marcha del reactor, estas no soportaron la temperatura, pues están diseñadas para un máximo de 1200°C , por lo que se fundieron y fue necesario retirarlas del reactor y reemplazarlas por más termocuplas tipo S, obteniéndose la configuración ya mencionada de 3 grupos de 3 termocuplas y una sola.

El reactor funcionará con una premezcla de gas natural, compuesto mayoritariamente por metano, y aire. Las líneas de aire y gas están ya disponibles e instaladas en el laboratorio de Termofluidos, por lo que solo deben hacerse pequeñas adaptaciones a estas para la instalación del reactor. Para controlar los flujos volumétricos, se utilizan controladores de flujo marca Omega, modelos FMA-2609A y FMA-2611A, que permiten seleccionar el gas con el que se va a trabajar. La premezcla de reactantes ocurre en la línea de alimentación del reactor: se

unen las líneas de gas natural y aire en una unión "T", para después entrar al reactor. A la salida del reactor se instala un sistema para la medición de emisiones, consistente de un tubo de acero inoxidable, que se conectará a la sonda del equipo analizador de gases. El tubo se inserta dentro del reactor, entre las esferas de alúmina, con el objetivo de que los gases que se midan, sean una muestra representativa de lo que se produce en el proceso de combustión, y no se diluyan en el aire, como ocurriría si la sonda se ubicara a la salida del reactor, en contacto con la atmósfera circundante.

5.2. Instrumentación

- **Termocuplas:** Las termocuplas o termopares, son un dispositivo utilizado para la medición de temperatura. Constan de dos cables muy finos, de distinta composición. Estos cables se unen entre si en un extremo, dejando el otro libre. Cuando se calienta el punto donde se unen ambos cables, debido a su distinta composición, entre sus dos extremos libres, se producirá una pequeña diferencia de voltaje, del orden de los milivolios. Este voltaje se mide y después, junto al dispositivo de adquisición de datos, puede interpretarse como la temperatura del punto de unión. Existen varios tipos de termocuplas, hechos de distintos materiales, y se suelen separar en dos grupos: los metales base (tipos J, K, T, E), y los metales nobles (tipo S, B, R), siendo el primero considerablemente más barato que el segundo. El tipo de termocupla a utilizar depende de la aplicación que se le quiera dar. Para los pares más caros, normalmente se utiliza también cable de compensado: un cable de otro material, más barato que los cables del termopar, que permita transmitir el voltaje. El cable de compensado es menos resistente a las altas temperaturas, por lo que debe instalarse termopar en la zona donde se quiera medir la temperatura, y fuera de esta, puede utilizarse compensado, para abaratar los costos sin perjudicar la calidad de las mediciones. Para este reactor, se utilizan termocuplas del fabricante Omega, tipo S, que consisten en un cable hecho de platino (Pt), y el otro de una aleación de platino y 10% de rodio (Rh). Estas pueden operar continuamente hasta 1600°C, y por tiempos reducidos hasta 1700°C, y presentan un error máximo de 1,5°C o 0,25% (el valor que sea más grande entre estos).
- **Dispositivo de adquisición de datos:** También conocido como Data logger, es un dispositivo electrónico que permite registrar datos, mediante sensores propios o externos. Para visualizar estos datos, pueden usarse en conjunto a una computadora, aunque algunos traen incorporada una pantalla que permita usarlos por si solos. Para este caso,

se busca registrar los datos obtenidos de las termocuplas, y se utilizará un data logger modelo PersonalDAQ56 del fabricante IOtech, en conjunto con el software Personal DaqView, instalado en un computador con sistema operativo Windows 7. El data logger cuenta con 16 entradas digitales y 20 entradas análogas. Las termocuplas emiten una señal análoga, y ambos extremos de cable deben conectarse en entradas distintas, por lo que este dispositivo permite conectar hasta 10 termocuplas. Este se conecta mediante un cable USB al computador, y mediante el software, es posible seleccionar qué hay conectado en cada entrada (en este caso, termocupla tipo S), para que este, en base a la señal de voltaje recibida, interprete correctamente a qué temperatura corresponde. El dispositivo registra la temperatura en intervalos de un segundo, y por la pantalla del computador se muestra en tiempo real las temperaturas medidas. Todos los datos medidos después se almacenan en un archivo, que puede ser fácilmente extraído para trabajar.

- o **Controladores de flujo:** Son dispositivos que permiten regular la cantidad de flujo que pasa por la línea de alimentación, para trabajar con la velocidad de filtración y relación de equivalencia deseada. En este caso, se utilizan dos controladores de flujo marca Omega, modelos FMA-2609A y FMA-2611A. En estos, se puede seleccionar el gas con el que se va a trabajar, entre opciones como aire, argón, metano, dióxido de carbono, entre otros, además de poder añadir mezclas personalizadas de estos gases. El principio de funcionamiento es que, al interior del controlador, cuentan con un Elemento de flujo laminar, esto es, una pieza que fuerza al flujo a un régimen laminar. En un flujo laminar, puede usarse la ecuación de Poiseuille para relacionar el flujo volumétrico con la caída de presión y la viscosidad. Así, se utiliza un sensor de presión en conjunto con el elemento de flujo laminar, para determinar el caudal. Cuenta además con sensor de presión y temperatura, que permiten ajustar el flujo volumétrico a condiciones estándar. Ambos modelos pertenecen a la misma serie, con la diferencia en la cantidad máxima de volumen que pueden controlar, y el diámetro de la conexión a las líneas, además de que el 2609A permite controlar el flujo con una precisión al segundo decimal, mientras que el 2611A solo al primero. Debido a los flujos con los que se va a trabajar, se asigna el 2609A al gas natural y 2611A al aire, debido a que los flujos de aire serán mucho mayores, y se requerirá la precisión adicional para el gas.
- o **Analizador de gases:** Para la medición de gases, se utiliza un analizador Bosch BEA 250. Este se conecta mediante una sonda, y permite medir CO (0,000-10,000 [%vol]), CO₂ (0,00-18,00 [%vol]), O₂ (0,00-22,00 [%vol]), NO (0-5000 [ppm]) y HC (0-9999

[ppm]), además de calcular el aire teórico λ del proceso, en base a los valores medidos. Para medir CO, CO₂ y HC, se utiliza el método infrarrojo no dispersivo, mientras que el O₂ se determina con un sensor de actuación electroquímica.

- o **Cámara termográfica:** Se utiliza una cámara termográfica para determinar las temperaturas en el exterior del reactor. El reactor cuenta con capas de aislante térmico interna (de 3mm de espesor) y externa (12mm), además de un recubrimiento con cinta de aluminio por el exterior para evitar fugas, por lo que la temperatura de la superficie es muy inferior a la temperatura alcanzada al interior del reactor. Aún así, se utiliza la cámara termográfica para intentar obtener una idea de la forma del frente de combustión, además de poder estudiar las pérdidas de calor del reactor al ambiente. Para esto, se utiliza una cámara Testo 868. Esta permite medir temperaturas desde -30°C hasta 650°C, detectando desde 0,08°C de diferencia, además de ajustar la emisividad térmica de la superficie y la temperatura reflejada (RTC).

5.3. Metodología

Los parámetros de entrada, o las variables que pueden ser modificadas directamente por el operador, son el flujo volumétrico de aire y de gas natural, y a través de estos es posible controlar la velocidad de filtración u y la relación de equivalencia ϕ . Las variables de salida, o lo que se busca medir, son las emisiones de gases y las temperaturas, y en base a estas últimas, determinar la ubicación del frente de combustión y calcular su velocidad u_{FC} .

Una vez que el reactor está instalado, se realizan pruebas exploratorias, con el objetivo de identificar problemas en la instalación, como fugas de combustible, y comprobar su funcionamiento. A continuación, se procede con las pruebas para estudiar el comportamiento del frente de combustión, para distintas combinaciones de u y ϕ .

En el capítulo anterior de este trabajo se explicó que el objetivo de estudiar un reactor con forma de codo, es poder avanzar hacia el nuevo modelo de reactor reciprocante circular. El objetivo de estos es aprovechar las propiedades de la combustión superadiabática, que ocurre cuando el frente de combustión se desplaza aguas abajo, en la misma dirección del flujo; es por esto que el estudio del comportamiento del frente de combustión en el reactor curvo se centrará en el uso de mezclas ultrapobres ($\phi < 0.5$), las que permiten que el frente de combustión viaje aguas abajo. El encendido del reactor se realiza a la salida de este, por lo que

es necesario utilizar una mezcla con mayor contenido de combustible (aunque manteniéndose en el rango de mezcla pobre $\phi < 1$) y que el frente de combustión viaje aguas arriba primero, para que este se ubique cerca de la entrada y después pueda moverse aguas abajo para poder estudiarlo, además de precalentar el reactor para facilitar la ignición de la mezcla ultrapobre. Debido a que no es de interés para el estudio cómo se comporta el frente de combustión cuando viaja aguas arriba, es que no se estudiarán más combinaciones de u y ϕ para esta situación.

Se utilizarán tres valores para u y tres para ϕ , detallados en la tabla 5.1, obteniéndose nueve combinaciones, con dos repeticiones para cada una, en orden aleatorio. A continuación, se describe el procedimiento para realizar las pruebas experimentales.

1. Ajustar los controladores de flujo para obtener una mezcla pobre que permita al frente viajar aguas arriba.
2. Encender el computador y el sistema de adquisición de datos para las termocuplas.
3. Encendido del reactor, con un encendedor en la salida de este.
4. Esperar hasta que el frente de combustión alcance la termocupla 0c.
5. Cambiar los flujos volumétricos de aire y gas en los controladores para obtener una mezcla ultrapobre.
6. Conectar la sonda del analizador de gases.
7. Esperar para determinar si hay extinción del frente de combustión o *blow-out*.

Para determinar si el frente de combustión está en una termocupla, se debe observar continuamente su temperatura. Mientras el frente viaja en dirección a la termocupla, aumentará continuamente su temperatura. Si la temperatura se mantiene constante en un valor alto (generalmente sobre 1000°C), se entenderá que el frente de combustión está ubicado justo sobre esta, y una vez que empiece a disminuir, es que este ha continuado avanzando. Es aquí cuando se cambiarán los flujos volumétricos. Es importante señalar también que estos deben cambiarse progresivamente; si se cambia de golpe, el controlador de flujo podrá presentar oscilaciones muy grandes en el flujo a medir y podrá causar la extinción del frente de combustión.

Se considerará que el frente de combustión se ha extinguido, cuando la temperatura de todas

las termocuplas este bajo 600°C. Determinar si ocurre un *blow-out* es más simple: se puede observar como la llama comienza a “escapar” por la salida del reactor. En general, se considera el *blow-out* como un resultado positivo: esto significa que el frente puede viajar aguas abajo, y si estuviera en el reactor circular que se busca construir, el frente podría viajar continuamente por este.

Tabla 5.1: Valores de u y ϕ utilizados

u	0.8	1.0	1.5
ϕ	0.20	0.25	0.35

Una vez que se tienen las mediciones de temperatura, es posible calcular la velocidad del frente de combustión u_{FC} . Esta se calcula como la distancia entre dos termocuplas, dividido por el tiempo que tarda el frente de combustión en llegar desde una a la otra. Las distancias entre las termocuplas son conocidas, pues ya están instaladas en el reactor y no cambian, mientras que para el tiempo, se calcula restando los tiempos en los que cada termocupla alcanza su máxima temperatura.

Se busca calcular la velocidad del frente de combustión en función del radio de curvatura, por lo que se calculará u_{FC} para cada línea: interior (1i-4i-7i), central (2c-5c-8c) y exterior (3e-6e-9e). Se calculará la velocidad entre dos termocuplas contiguas, como 1i-4i y 4i-7i (pero no entre 1i-7i) y se considerará el promedio entre estas dos como la velocidad del frente de combustión en esa línea. En la línea central existe también la termocupla 0c, por lo que podría calcularse el promedio con tres velocidades, pero esta no será considerada por dos razones: primero, para hacer una comparación justa entre las tres líneas, usando la misma cantidad de datos entre todas, y segundo, porque como se señaló anteriormente, cuando el frente de combustión está cerca de 0c se realiza el cambio progresivo de ϕ , por lo que su temperatura máxima y el instante en el que la alcanza no representa realmente la combinación de u y ϕ a la que se quiere trabajar.

Para determinar si el proceso de combustión es superadiabático, se utiliza la siguiente adimensionalización de la temperatura

$$\theta = \frac{T_{max} - T_0}{T_{adi} - T_0} \quad (5.1)$$

donde T_{max} es la temperatura de combustión máxima obtenida durante el proceso, T_0 es la temperatura ambiente y T_{adi} es la temperatura adiabática, o máximo teórico, calculada al

usar $Q = 0$ en la eq. 3.7. Un valor de $\theta > 1$ indica que el incremento de temperatura en el proceso de combustión, es mayor al incremento de temperatura que ocasionaría un proceso de combustión en una llama libre adiabática.

Respecto a las mediciones de gases, la sonda no está conectada durante todo el proceso, sino que se conecta en momentos aleatorios para comprobar la emisión de sustancias contaminantes en cualquier instante. Se esperaría que las emisiones de contaminantes sean muy bajas, debido a las ventajas de la combustión en MPI y a que se está trabajando con mezclas ultrapobres. Se reportará el valor máximo y promedio de las mediciones de contaminantes durante el proceso.

Para algunas mediciones, se utilizó una cámara termográfica, que permite determinar la temperatura superficial del reactor. En base a esto, es posible estimar las pérdidas de calor del reactor, usando la ecuación 3.18. Se dividirá la superficie del reactor en dos superficies: interior y exterior, señaladas como Wall 1 y Wall 2, respectivamente, en la fig. 5.3. La división se realiza en la línea central, señalada con una línea discontinua en la misma figura. Esta división se realiza para calcular dos flujos de calor separados, debido a que ambas caras tienen distinta área, distinto coeficiente de convección, ya que una apunta hacia arriba y otra hacia abajo, y lo más importante, distintas temperaturas superficiales. A su vez, para el cálculo del flujo en cada dirección, estas superficies se dividirán en áreas más pequeñas, pues la temperatura no es uniforme a lo largo del reactor, y será más alta en las cercanías del frente de combustión. Las áreas se calculan en base al área superficial de un toro, obteniéndose $A = \frac{\pi r}{2}(\pi R \pm 2r)$. En el signo \pm , para la superficie exterior se utiliza $+$ y para la interior $-$. Las temperaturas son obtenidas a partir del software asociado a la cámara térmica.

Los flujos volumétricos de aire y gas que deben ajustarse en los controladores de flujo se calculan utilizando la relación de equivalencia y el flujo volumétrico total, a través de la siguiente ecuación

$$\begin{aligned} \dot{V}_{gas} &= \frac{\phi}{\phi + 9.52} \dot{V} \\ \dot{V}_{air} &= \frac{9.52}{\phi + 9.52} \dot{V}. \end{aligned} \tag{5.2}$$

La velocidad de filtración se relaciona con el flujo volumétrico a través del área transversal del reactor, considerando la porosidad. Dado que el área transversal y porosidad son constantes

a lo largo del reactor, se utiliza la siguiente ecuación, ajustada para las unidades de medida, para calcular u :

$$u = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{V}}{\pi(D^2/4)\epsilon} \quad (5.3)$$

$$u \text{ [m/s]} = 0.03316 \cdot \dot{V} \text{ [L/min]}.$$

Tabla 5.2: Flujos volumétricos utilizados

u [m/s]	ϕ [-]	\dot{V}_{gas} [LPM]	\dot{V}_{air} [LPM]
0.8	0.20	0.51	24.5
	0.25	0.64	24.4
	0.35	0.89	24.1
1.0	0.20	0.62	29.4
	0.25	0.77	29.2
	0.35	1.06	28.9
1.5	0.20	0.93	44.3
	0.25	1.16	44.1
	0.35	1.60	43.6

5.4. Resultados y análisis

Se realizaron las 18 mediciones propuestas en la metodología, correspondiente a 2 repeticiones para cada uno de las 9 combinaciones de u y ϕ . Los flujos volumétricos son calculados utilizando las ec. 5.2 y 5.3, y se presentan en la tabla 5.2. En la tabla 5.3 se presentan los resultados generales, señalando si ocurre un blow-out o extinción para cada caso. Para $\phi = 0.2$, con $u = 1.0$ [m/s] y 1.5 [m/s], se señala con un asterisco, pues en la primera prueba ocurrió un blow-out, mientras que para la segunda, la llama se extinguió antes de llegar a la salida. Se realizó una tercera repetición, resultando nuevamente en una extinción. Aún así, dado que por lo menos una vez se logró sostener la combustión para un valor de ϕ muy bajo, se reportarán los datos de la medición en la que ocurrió el blow-out, para compararlo con los otros casos.

El blow-out se considera un resultado positivo: significa que es posible sostener un proceso de combustión para las condiciones señaladas, y además, el frente de combustión puede propagarse a través del largo completo del codo. Esto podría ser un buen indicador de que es posible la propagación alrededor del reactor circular propuesto, pero es necesaria más

información para determinar esto.

Tabla 5.3: Resultados de las pruebas experimentales

u/ϕ	0.20	0.25	0.35
0.8	Blow-out*	Blow-out	Blow-out
1.0	Blow-out*	Blow-out	Blow-out
1.5	Extinción	Blow-out	Blow-out

5.4.1. Desempeño térmico

En las figuras 5.4, 5.5 y 5.6, se presentan los perfiles de temperatura obtenidos a partir de las termocupas, para un frente de combustión viajando aguas abajo. Se presentan solo algunos casos, mientras el resto puede ser encontrado en los Anexos de este documento. En la fig. 5.3 se presentó la nomenclatura y distribución de termocupas; para los gráficos de temperatura, las termocupas de un mismo grupo se señalan con el mismo símbolo sobre las curvas (triángulo, cuadrado o círculo), mientras que las que corresponden a una misma línea (i , c , e) comparten color.

Se determina que el frente de combustión viaja aguas abajo, debido al orden en que las termocupas alcanzan su máximo: para la línea central (en naranja) primero $0c$, seguido por $2c$, $5c$ y finalmente $8c$. Se observa que los máximos de temperatura dentro de un grupo (como $1i$, $2c$, $3e$) siguen un patrón: **la termocupla en la línea interior es la primera en alcanzar su máximo, seguida por la del centro, y finalmente la exterior.** También puede observarse que el máximo de temperatura siempre sigue un mismo orden, siendo **la termocupla central la que alcanza una mayor temperatura, seguida por la interior y al último la exterior.** La excepción a este comportamiento es la termocupla $1i$, que supera a $2c$. Esto se debe a que, como se señaló antes, el cambio de una mezcla pobre a una ultra-pobre se realiza cuando el frente de combustión se encuentra sobre la termocupla $0c$, por lo que esta no es considerada en los análisis, ya que su comportamiento es influenciado por una mezcla con mayor contenido de combustible, y no representa a la mezcla ultra-pobre que se estudia. El cambio de ϕ se realiza gradualmente, para evitar grandes oscilaciones en los controladores de flujo, por lo que es posible que, cuando el frente de combustión alcanza la termocupla $1i$, aún se tenga una mezcla más rica que la que se busca estudiar, lo que explicaría por qué su pico de temperatura es mayor al de $2c$. Aún así, sí se considera esta termocupla para el resto del análisis, siendo $0c$ la única excluida. Estos comportamientos se repiten de forma consistente para todas las combinaciones de u y ϕ .

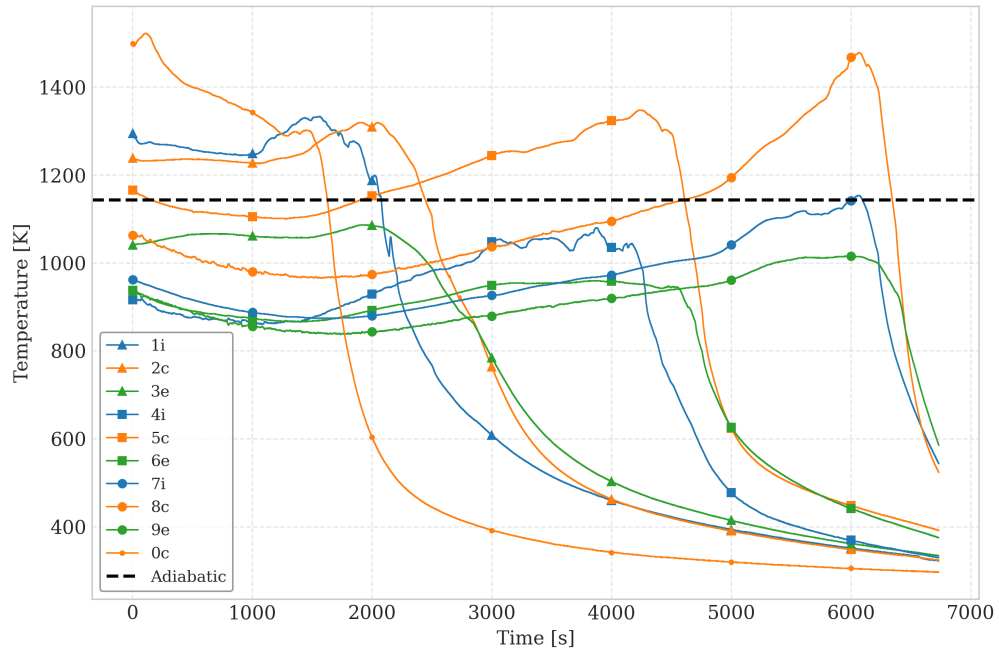


Figura 5.4: Temperaturas para $u = 0.8 [m/s]$ y $\phi = 0.35$.

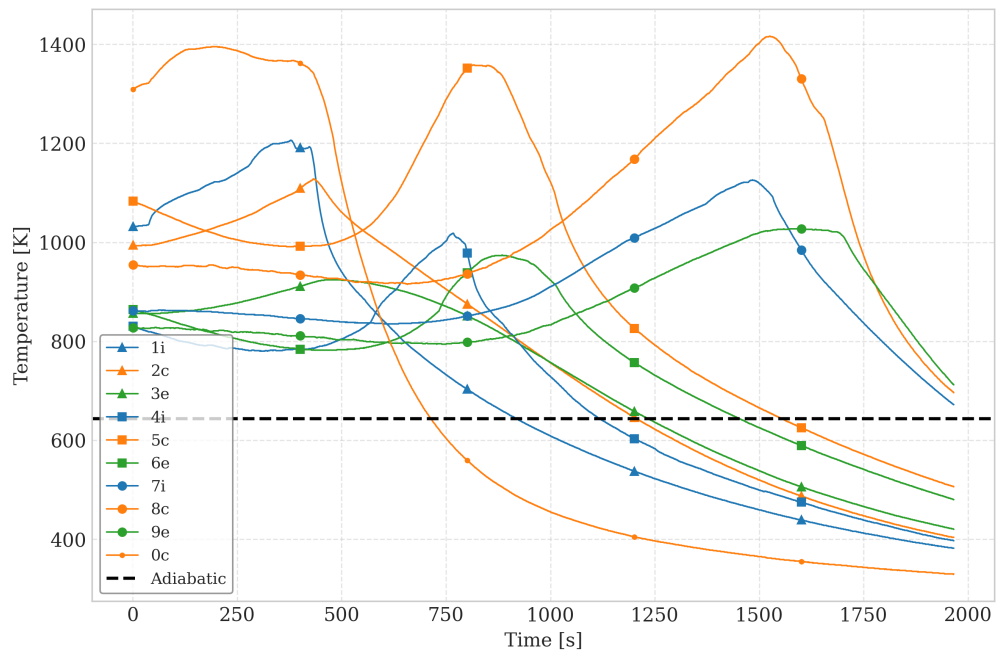


Figura 5.5: Temperaturas para $u = 1.0 [m/s]$ y $\phi = 0.20$.

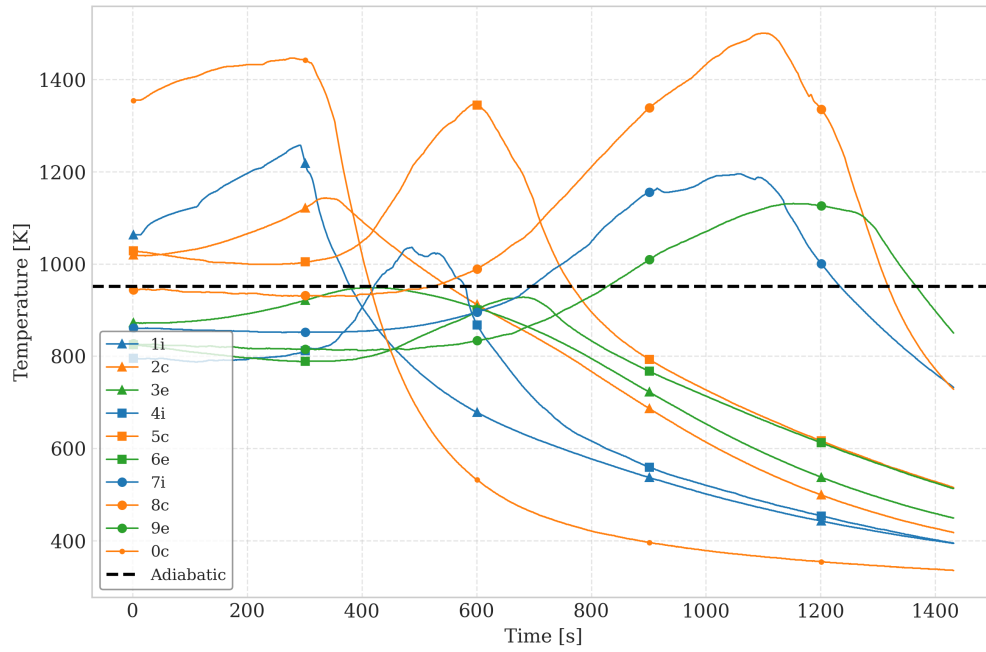


Figura 5.6: Temperaturas para $u = 1.5 [m/s]$ y $\phi = 0.25$.

Tabla 5.4: Temperaturas adiabáticas y máximas obtenidas.

ϕ [-]	u [m/s]	T_{adi} [K]	T_{max1} [K]	T_{max2} [K]
0.2	0.8	644	1382	ext
	1.0		1416	ext
	1.5		ext	ext
0.25	0.8	951	1387	1445
	1.0		1453	1447
	1.5		1500	1574
0.35	0.8	1174	1476	1478
	1.0		1519	1509
	1.5		1522	1550

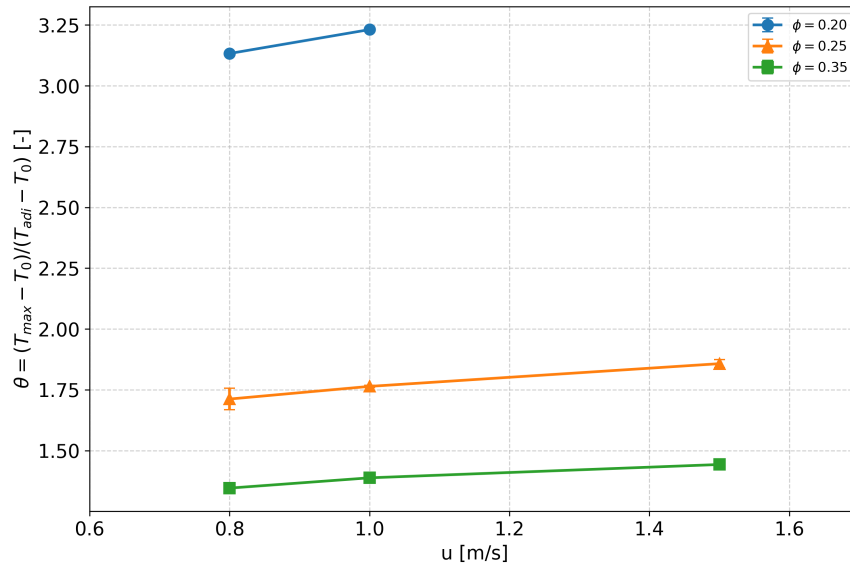


Figura 5.7: Temperatura de combustión superadiabática.

En la ec. 3.7, se presenta como calcular la temperatura de llama adiabática. Esta depende de la composición de la mezcla, es decir, está relacionada con ϕ . En la tabla 5.4 se presentan las temperaturas de llama adiabática T_{adi} calculadas, junto a las temperaturas máximas obtenidas para cada repetición del experimento, señaladas como T_{max1} y T_{max2} . La temperatura máxima alcanzada aumenta cuando aumentan ϕ y u , debido a que la mezcla contiene una mayor cantidad de combustible y energía para liberar. En las fig. 5.4, 5.5 y 5.6, se representa T_{adi} mediante una línea negra discontinua; es fácil observar como las temperaturas obtenidas al interior del reactor superan la temperatura adiabática, confirmando que se alcanza una combustión superadiabática. Usando la ec. 5.1, es posible cuantificar en qué grado se alcanzó la temperatura superadiabática, y se presenta en la fig. 5.7. El valor de θ aumenta significativamente cuando disminuye ϕ , principalmente debido a que las temperaturas máximas obtenidas son similares para todos los experimentos, pero la temperatura de llama adiabática para $\phi = 0.2$ es muy baja, 644 K o 371 °C, por debajo incluso de la temperatura de autoignición del metano de 540 °C. Gracias a la recirculación de calor a través de la matriz sólida dentro del reactor, precalentando la mezcla de aire y combustible antes de llegar a la zona de reacción, es posible alcanzar altas temperaturas, las que permitirían extraer el calor como energía útil para ser utilizadas en otro proceso, mientras se utilizan mezclas ultra-pobres, disminuyendo así el consumo de combustible.

5.4.2. Velocidades del frente de combustión

El foco principal de el estudio del reactor con forma de codo de 90° es determinar cómo se propaga el frente de combustión a lo largo de una curva. En la fig. 4.6 se presentaron dos posibilidades de cómo podría comportarse el frente al interior, y es mediante las velocidades del frente de combustión que se busca determinar esto.

En las fig. 5.4, 5.5 y 5.6, se observa que las termocuplas de un mismo grupo, con una misma posición angular, no alcanzan su pico de temperatura al mismo tiempo, lo que podría indicar que el frente de combustión no mantiene una forma perfectamente radial, como la imagen de la izquierda en la fig. 4.6. Se calculó la velocidad del frente de combustión para todas las combinaciones de u y ϕ , además de para las tres líneas al interior del quemador (interior, central y exterior). Los resultados se presentan en la fig. 5.8; los símbolos sobre las curvas (círculo, triángulo o cuadrado) representan las distintas relaciones de equivalencia, mientras que las líneas al interior del reactor son representadas por color. Las velocidades obtenidas son del orden de 10^{-4} [m/s], lo que corresponde al régimen de baja velocidad, con un alto intercambio de calor entre las fases gaseosa y sólida [4]. Es fácil observar que, para una mayor velocidad de filtración u y para una menor relación de equivalencia ϕ , aumenta la velocidad del frente de combustión u_{FC} . Estos resultados coinciden con la teoría y con estudios anteriores. La novedad de este estudio recae en las distintas velocidades del frente de combustión para distintas líneas, o radios de curvatura. A pesar de que en la entrada el flujo se divide de forma uniforme, por lo que la velocidad de flujo es la misma para todos los radios de curvatura, es posible observar una tendencia: **la velocidad del frente de combustión aumenta junto con el radio de curvatura**, es decir, es mayor en la línea exterior, seguida por la central y finalmente la interior. Para algunos casos se observa que la velocidad interior supera a la central, pero la tendencia se mantiene. Así, la mayor distancia que debe cubrir el frente de combustión al viajar por la línea exterior del reactor, es compensada por una mayor velocidad. Esto indica que **el frente de combustión mantiene una forma similar a una radial, lo que le permite propagarse a lo largo de una curva**. Estos resultados permitirían avanzar a una siguiente fase en el proyecto del reactor circular, pues se ha demostrado que es viable el uso de medios porosos inertes en un quemador curvo.

5.4.3. Termografía y pérdidas de calor

Se utilizó una cámara térmica TESTO 868 para medir la temperatura superficial del reactor. Esta no fue utilizada para todas las mediciones, debido a la disponibilidad del equipo.

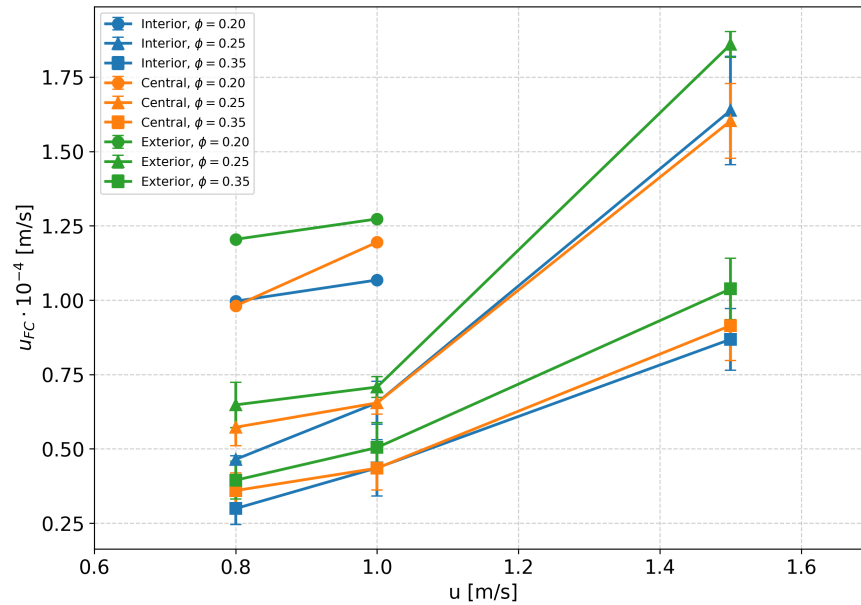


Figura 5.8: Velocidades del frente de combustión

La idea inicial de la cámara térmica era identificar la forma del frente de combustión, pues se esperaba que las paredes del reactor se calentaran en la zona donde esté ubicada la llama. En la fig. 5.9, se observa que esto no fue posible. Durante el diseño del experimento y la metodología se consideró que, debido al aislante que rodea el reactor, que es necesario para disminuir las pérdidas de calor y estabilizar la llama, la temperatura exterior es muy inferior a la que se obtiene al interior del reactor, sin embargo, se esperaba que las diferencias de temperaturas fueran suficientes para que la cámara las registrase y pudiera generar un mapa de color en función de la ubicación del frente. Existe una diferencia de temperaturas suficiente, pero como se observa en la fig. 5.9, las varillas portatermocuplas, que atraviesan el reactor y por lo tanto están en contacto directo con la llama, están a una temperatura mucho mayor al resto del reactor. Si bien la cámara aún registra la temperatura de los otros puntos, al existir estos puntos con una temperatura mucho mayor, el mapa de color no permite detectar las diferencias de temperatura en la superficie del reactor para determinar donde se encuentra el frente de combustión.

Pese a esto, la termografía resultó ser útil y permitirá calcular las pérdidas de calor en el reactor. En la fig. 5.10 (a) se presenta otra imagen térmica, más cercana a la zona donde se encuentra el frente de combustión. Se presenta también el perfil de temperatura sobre la línea blanca de (a); desde la cara con menor radio de curvatura, que fue señalada como Wall 1 en la fig. 5.3, y que aquí corresponde al lado izquierdo del gráfico en la fig. 5.10 b, hasta

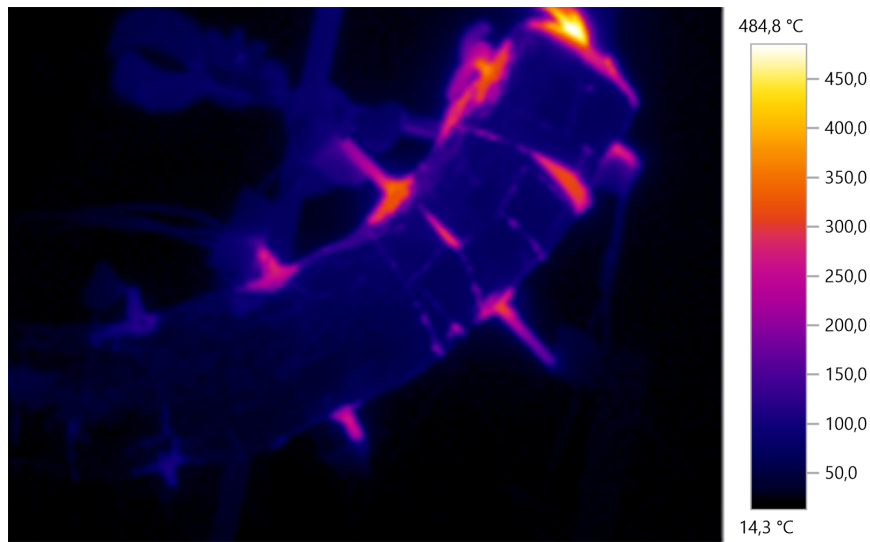


Figura 5.9: Imágen térmica del reactor

la cara exterior, o Wall 2 (lado derecho del gráfico en 5.10 b). En el gráfico, se evidencia que las temperaturas son mayores en la cara con menor radio de curvatura (Wall 1), debido a que dentro del reactor, se alcanzan mayores temperaturas en la línea interior, como se presentó en las fig. 5.4, 5.5 y 5.6. Si bien aquí se presenta solo un gráfico de temperatura, este comportamiento es consistente a lo largo del reactor. Para calcular las pérdidas de calor, se utiliza la ec. 3.18, y se divide la superficie en dos mitades, obteniendo un flujo de calor hacia el interior de la circunferencia \dot{Q}_1 (a través de Wall 1) y hacia el exterior \dot{Q}_2 (a través de Wall 2). La superficie exterior tiene una mayor área, mientras que la interior presenta mayores temperaturas y un coeficiente de convección natural ligeramente mayor, debido a que está apuntando hacia arriba, lo que permite que el aire circule de mejor forma y retire calor de forma más efectiva. Así, para la imágen térmica presentada en la fig. 5.9, las pérdidas de calor son $\dot{Q}_1 = 3.34 [W]$ y $\dot{Q}_2 = 0.95 [W]$, es decir, **las pérdidas de calor son mayores a través del lado interior del reactor**, a pesar de que el lado exterior tiene una mayor superficie. Pensando en el reactor circular y sus aplicaciones futuras, este resultado podría representar una ventaja: el reactor podría instalarse alrededor de una tubería, pasando esta por el centro, lo que permitiría extraer una mayor cantidad de calor desde el quemador hacia la tubería, lo que permitiría utilizar esta energía en algún proceso que la requiera, como calentar un fluido para un proceso de producción de potencia.

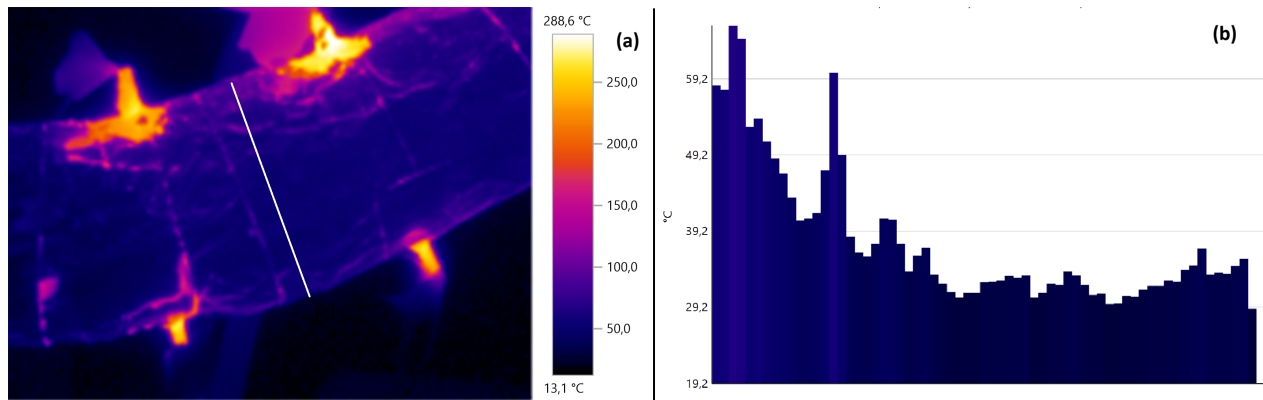


Figura 5.10: (a) Imágen térmica del reactor. (b) Perfil de temperatura en la línea blanca de (a).

5.4.4. Emisiones

Como se señaló anteriormente, los reactores de MPI son una buena alternativa para reducir las emisiones de los procesos de combustión, pues permiten utilizar mezclas más pobres en combustible, y al aumentar el tiempo de residencia de las sustancias al interior del reactor, facilita el alcanzar la combustión completa de los productos intermedios.

Para el reactor curvo, se midieron emisiones de CO, en [%vol], HC y NO, ambas en [ppm]. En las tablas 5.5, 5.6 y 5.7, se presentan las emisiones promedio de reactor para cada punto de operación. Se observa que en general, las emisiones son bastante bajas. No se alcanzaron temperaturas por sobre los 1500°C en el reactor, por lo que la producción de NO es muy pequeña, por debajo de una partícula por millón en varios casos. Respecto a CO y HC, las emisiones también son bajas, **lo que indica que se alcanza una combustión completa.** Es importante destacar que los valores reportados son los valores promedio, obtenidos una vez que la llama es estable y viaja aguas abajo. Cuando se realiza el cambio desde una mezcla cercana a la estequiometría a la mezcla ultra-pobre utilizada, debido a las oscilaciones y cambio de los flujos, puede producirse un apagado local de llama en algunos poros, lo que eleva las emisiones a un valor poco representativo. Por esa misma razón es que tampoco se reportan emisiones para $\phi = 0.2$ y $u = 1.5$; a pesar de que la llama se mantuvo encendida durante un tiempo, se obtienen valores demasiado altos, que indica una extinción de la llama.

Tabla 5.5: Emisiones de CO [%vol]

u/ϕ	0.20	0.25	0.35
0.8	0.043	0.033	0.027
1.0	0.008	0.042	0.019
1.5	-	0.018	0.005

Tabla 5.6: Emisiones de NO [ppm]

u/ϕ	0.20	0.25	0.35
0.8	0.5	2.2	1.0
1.0	1.7	0.3	0.8
1.5	-	0.7	1.5

Tabla 5.7: Emisiones de HC [ppm]

u/ϕ	0.20	0.25	0.35
0.8	7.5	9.2	0.0
1.0	0.0	6.0	7.5
1.5	-	6.0	0.0

Capítulo 6

Enfoque computacional

Como ya se ha señalado, **no se han encontrado investigaciones para medios porosos en curvas**. En el capítulo anterior, mediante el enfoque experimental, se estudió cómo se comporta el frente de combustión frente a una curva, así como las temperaturas y emisiones contaminantes. En el modelo matemático para combustión en MPI, descrito en las ecuaciones 3.11-3.17, podrían agruparse los términos en tres categorías: aquellos asociados a la hidrodinámica y velocidades del flujo, los que tienen relación a la transferencia de calor y efectos térmicos, y los términos vinculados a la reacción química y a la cinética. En el enfoque experimental, fueron abordados los dos últimos grupos. La parte térmica fue estudiada mediante las termocuplas al interior del reactor, para determinar el movimiento del frente de combustión y sus temperaturas, junto a la cámara térmica para calcular las pérdidas de calor hacia el exterior. Por otro lado, los fenómenos relacionados a la cinética química y a la reacción de combustión, también podrían considerarse en parte estudiados: la medición de gases permitió determinar que dentro del reactor ocurre un proceso de combustión completa. Si bien podría realizarse un estudio mucho más detallado de la cinética de reacción, los resultados obtenidos demuestran que con una cinética simple es posible representar el proceso que ocurre al interior del reactor. El aspecto que no fue estudiado con la metodología experimental es el comportamiento del flujo de gas al interior del reactor. Si bien se controlan los flujos volumétricos de aire y gas natural a la entrada del reactor, esto solo indica la velocidad de filtración promedio y caudal total que hay al interior del reactor, pero no entrega información sobre cómo se distribuye el flujo al interior de este ni como se comporta. Una de las razones por las que esto no fue estudiado, es por la dificultad de realizar mediciones de velocidad al interior del reactor. Es por esto que, a través de la simulación computacional,

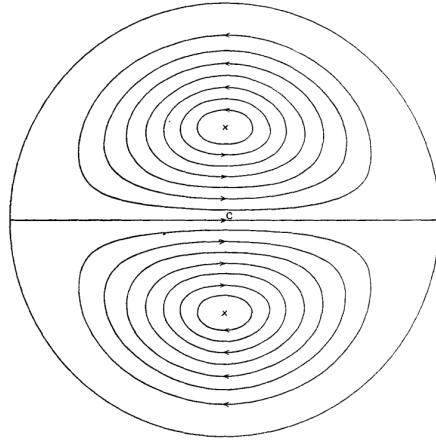


Figura 6.1: Vórtices de Dean en la sección transversal de un codo (Dean 1927 [11]).

se busca estudiar cómo afecta el medio poroso y la geometría curva del reactor al gas que lo atraviesa. Para esto, se realizará una simulación de *cold-flow*, es decir, sin reacción química de combustión, únicamente con aire, para determinar las velocidades y comportamiento del gas al interior del reactor, buscando explicar y entender el proceso de combustión desde la hidrodinámica.

Si bien no se han estudiado curvas con medios porosos, los codos de tubería si han sido estudiados a profundidad. Estos son elementos vitales en muchos sistemas de transportes de fluidos, ya sean gases o líquidos, tanto a nivel industrial como doméstico. Para evitar grandes pérdidas de carga e inestabilidades en el flujo, es que se han realizado investigaciones respecto al comportamiento del fluido al interior de estos, tanto experimentales como computacionales. En un codo, debido a la rotación, el flujo es sometido a fuerzas centrífugas, lo que afecta su comportamiento. En 1927, Dean estudió el comportamiento del fluido en codos, y determinó que, además del movimiento principal del flujo, siguiendo la tubería, se forma un movimiento secundario en la sección transversal, generándose vortices que alteran el perfil de velocidad del flujo, desplazando el máximo de velocidad desde el centro hacia la pared exterior de la curva [11]. El cambio en el flujo debido al codo de tubería puede ser cuantificado mediante el número adimensional de Dean

$$De = Re \sqrt{\frac{D_t}{2R_c}} \quad (6.1)$$

donde Re es el número de Reynolds, D_t el diámetro del tubo y R_c el radio de curvatura. A medida que aumenta De , aumenta también el efecto de los vórtices. Se considera que para $De < 60$, no se generan vortices secundarios y el flujo mantiene la dirección del codo. Para

valores de $De < 200$, los vórtices se mantienen estables, como los que se ven en la fig. 6.1, y para De mayores, comienzan a aparecer oscilaciones en los vórtices y el flujo transiciona a uno completamente turbulento.

En 1998, Sudo, Sumida y Hibara investigaron experimentalmente el comportamiento de un flujo turbulento en un codo de tubería, para $Re = 6 \cdot 10^4$, midiendo velocidades con un alambre caliente, para obtener perfiles de velocidad, contornos de los vórtices de Dean e intensidad turbulenta [40]. Kim, Yadav y Kim (2014) también estudiaron el comportamiento de flujos turbulentos en codos de 90° , pero con un enfoque computacional, comparando distintos modelos de turbulencia para determinar cuál permite representar de mejor forma los fenómenos que ocurren en los codos [26]. Taibi, Yin y Ong (2021) estudiaron computacionalmente el comportamiento del flujo en tuberías para distintas combinaciones de Re y De , evaluando la evolución de los perfiles de velocidad [41]. Este último será utilizado para comparar los resultados obtenidos en la simulación de este trabajo y validar el modelo utilizado, pues al igual que el presente estudio, trabaja en un régimen laminar.

6.1. Metodología

Ansys Fluent es uno de los software más utilizados a nivel global para simulaciones de fluidos, pues permite simular una gran variedad de situaciones relacionados a la mecánica de fluidos, utilizando el método de volúmenes finitos (FVM) para resolver las ecuaciones diferenciales parciales que modelan los fenómenos. Al ser un software comercial, tiene la desventaja de ser una “caja negra”, pues como usuario se deben configurar los parámetros y modelos a utilizar para que el programa entregue una solución, pero no se tiene control o información detallada de lo que ocurre durante la resolución de las ecuaciones, como si se tendría para un programa escrito por el mismo usuario. Además, en general, tiene mayores tiempos de cómputo en relación a lenguajes de programación como Fortran o C++. No todo son contras; entre sus ventajas está que no es necesaria una etapa de escribir un código computacional antes de simular, puede usarse el software directamente, además de poder realizar modificaciones a la situación que se busca simular, agregar modelos, añadir funciones definidas por el usuario, y cambiar métodos numéricos y parámetros fácilmente. El software incluye también funciones para elaborar las mallas para la discretización, y el post-procesamiento de los datos de forma sencilla y visual, y a pesar de ser una “caja negra”, un usuario con los conocimientos necesarios puede sacar el máximo provecho de las funciones de este progra-

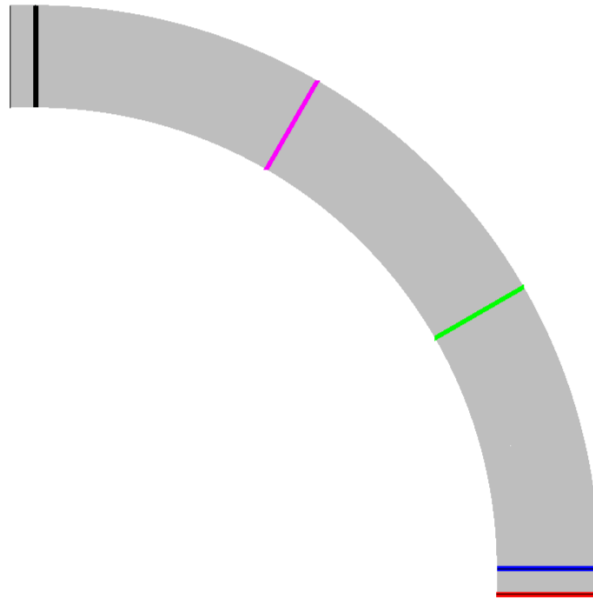


Figura 6.2: Líneas de medición de perfiles de velocidad para el codo.

ma. Para este trabajo, resulta particularmente atractivo por incluir una función para definir zonas del dominio como medio poroso, y que estas tengan una fracción sólida y otra de fluido.

En primer lugar, se estudiará el flujo al interior de un cilindro, para tres casos distintos: sin medio poroso, con porosidad constante, y con porosidad variable, modificando además el número de Reynolds Re . El flujo en una tubería ya ha sido estudiado anteriormente, por lo que esto servirá para validar el modelo computacional y compararlo con el comportamiento en una geometría distinta. La otra geometría a estudiar es la de un codo de tubería, o un cuarto de toro, como el quemador estudiado en el capítulo anterior de este trabajo, también para tres modelos de porosidad distintos. Existen estudios para los codos de tubería sin medio poroso, por lo que se busca determinar cómo afecta el medio poroso al flujo a través del codo de tubería. El caso del cilindro será modelado en dos dimensiones, debido a que la situación física es axisimétrica, y esto permite reducir el costo computacional, mientras que el codo debe ser modelado en tres dimensiones, para poder captar todos los fenómenos físicos que ocurren al interior de este.

Para el cilindro se presentarán gráficos con la evolución del perfil de velocidad a lo largo de este, mientras que para el codo se presentarán figuras con líneas de corriente, contornos de velocidad, y gráficos con la evolución del perfil de velocidad. Estos últimos son calculados sobre el eje de simetría del reactor, en líneas para diferentes ángulos, como las que se muestran

en la fig. 6.2. El perfil de entrada del flujo se define en la línea roja, y el medio poroso se ubica entre las líneas azul y negra.

6.1.1. Parámetros de la simulación

Para la simulación en Ansys Fluent, debido a que no se modelará el fenómeno de combustión, no se activan los modelos de energía o especie química. Debido a que no existirá una onda de combustión que se propague por el reactor, y solo se tendrá flujo de aire, la simulación se realizará para un **caso estacionario**, pues no existe ninguna variable que evolucione en el tiempo para este modelo. Para la turbulencia, se utiliza el **modelo Laminar**, es decir, no se incorpora un modelo de turbulencia, y se resuelven directamente las ecuaciones de Navier Stokes. En el interior de una tubería, el flujo es laminar para $Re < 2400$, por lo que, en el rango de Re que se trabajará, siempre se tendrá flujo laminar. Se utiliza **aire como fluido de trabajo**, siendo sus dos propiedades relevantes su densidad $\rho_{air} = 1.225 [kg/m^3]$ y su viscosidad dinámica $\mu_{air} = 1.7894 \cdot 10^{-5} [kg/m \cdot s]$, las que se mantendrán constantes durante la simulación. Para las condiciones de borde, **en la entrada se fija un perfil de velocidad parabólico**, con valores de 0 en las paredes y el máximo en el centro de la tubería, correspondiente al perfil de un flujo desarrollado a lo largo de una tubería. La velocidad utilizada para calcular Re es la velocidad media del perfil de velocidad. **Para la salida, se utiliza una condición de outflow**, esto es, que no se tienen detalles a la salida, y el programa extrapolará la información con los datos del interior. Este modelo no puede ser utilizado si las condiciones de entrada son de presión, o si se modela un problema con densidad variable; ninguna de las dos condiciones aplica para este caso, por lo que la condición de outflow puede ser utilizada sin problemas. Por último, **las paredes tienen condición de no deslizamiento e impermeabilidad**, es decir, la velocidad en cualquier dirección es 0 sobre estas. Para el **acople de presión y velocidad se utiliza el método SIMPLE** (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations), con discretizaciones espaciales de segundo orden para la presión y momentum. Se considera que la solución converge cuando los residuales de la ecuación de continuidad y de la velocidad en los ejes x , y , z bajan de 10^{-6} .

Para ambas geometrías, el dominio se divide en tres zonas. *inlet*, *pm* y *outlet*. La zona *pm* corresponde a donde se ubicará el medio poroso. Para el cilindro, tiene un largo de 300 mm, y un ancho de 20 mm, que debido a la simetría axial de esta geometría, corresponde a un diámetro de 40 mm. El tamaño de elemento es de 0.5 mm, refinado cerca de las paredes,

lo que se traduce en una malla con 36000 elementos. En el caso del codo, tiene las mismas dimensiones de el reactor del enfoque experimental, es decir, un codo de 90° , con 40 mm de diametro y un radio de curvatura (para el centro del tubo) de 200 mm, con un tamaño de elemento de 2 mm, también refinado cerca de las paredes, entregando un total de 280000 elementos. Las zonas de *inlet* y *outlet* se agregan para asegurarse de que no existan ambigüedades al definir las condiciones de borde; si se entrega una velocidad como condición a la entrada del medio poroso, Fluent podría interpretarlo como la velocidad de flujo libre o como la velocidad de filtración en el medio poroso, por lo que se agregan estas zonas adicionales, que en todos los casos son únicamente fluido, para definir las condiciones de entrada y salida ya mencionadas. Ambas zonas son rectas, con un largo de 15 mm y un diametro igual al del tubo o codo, según corresponda.

6.1.2. Modelos de porosidad

Para los casos sin medio poroso, tanto en el cilindro como en el codo, la configuración descrita en la sección anterior es suficiente. Para los casos con porosidad, es necesario seleccionar en el programa que la zona *pm* es una zona porosa, lo que generará una parte sólida y una parte de fluido. La influencia del medio poroso en el flujo es caracterizada a través de un término sumidero de momentum, como una caída de presión por unidad de distancia, debido a la presencia de la fase sólida, que obstaculiza el flujo de aire (Ergun, 1949 [15]). Este término tiene la forma

$$\frac{\Delta p}{l} = \left(\frac{\mu_g}{\alpha} + \frac{1}{2} C_2 \rho_g \|\vec{u}\| \right) \vec{u}. \quad (6.2)$$

El primer término está asociado a las pérdidas por la permeabilidad del sólido, donde α [m^2] permeabilidad del sólido, o el inverso de la resistencia viscosa, y se calcula como

$$\alpha = \frac{d_p^2 \cdot \epsilon^3}{150(1 - \epsilon)} \quad (6.3)$$

mientras que el segundo término de la eq. 6.2 se relaciona con las pérdidas inerciales del flujo, donde C_2 [m^{-1}] corresponde a la resistencia inercial, y se calcula como

$$C_2 = \frac{3.5(1 - \epsilon)}{d_p \cdot \epsilon^3}. \quad (6.4)$$

En ambos casos, d_p corresponde al diámetro de la esfera, en este caso 5.6 [mm], y ϵ es la porosidad. Se utilizarán dos modelos de porosidad, uno con porosidad constante y otro

con porosidad en función del radio. Cuando se utilizan espumas cerámicas, estas tienen una porosidad constante, determinada por el fabricante. Si se utiliza un lecho empacado de esferas como medio poroso, la porosidad no es constante a lo largo del reactor: en el centro, lejos de la pared, las esferas se apilan unas sobre otras, lo que entrega un valor de porosidad uniforme, pero hacia afuera de la tubería, donde las esferas están en contacto con la pared, la distribución es diferente y existirán poros más grandes, debido a que la pared no puede acomodarse para ocupar el espacio disponible que dejan las esferas. En la fig. 6.3 se presenta una recopilación de resultados de varios estudios, que buscan determinar como varía la porosidad en función del radio, donde el eje de las abscisas corresponde a una relación entre la distancia a la pared y el diámetro de esfera. Se observa que, para $z=0$ (en contacto con la pared), la porosidad es máxima, y esta va disminuyendo hasta estabilizarse en un valor medio. En una tubería con un diámetro mucho mayor al de las esferas, el valor de la porosidad media se estabilizará en el centro, pudiendo aproximarse como una porosidad constante. Para el reactor de MPI estudiado en el capítulo anterior, la relación entre el diámetro del tubo D_t y el diámetro de partícula (en este caso de la esfera) d_p es $D_t/d_p = 40 \text{ mm}/5.6 \text{ mm} = 7.14$, con el centro del reactor ubicado en $z = 3.57$ para la fig. 6.3; la porosidad presentará grandes oscilaciones, por lo que aproximararlo como una porosidad constante podría no ser lo más adecuado.

En el estudio de Guo et al. (2019) [19], se presentan modelos de varios autores para calcular la porosidad media para un lecho empacado de esferas, para distintos rangos de D_t/d_p . Para este caso, se utilizará el modelo propuesto por Ribeiro et al. (2010) [37], presentado en la ec. 6.5, obteniendo un valor de $\epsilon = 0.37578$ para el tubo y esferas modelado.

$$\epsilon = 0.373 + 0.917 \exp\left(-0.824 \frac{D_t}{d_p}\right) \quad 2 \leq \frac{D_t}{d_p} \leq 19 \quad (6.5)$$

Para el caso de porosidad constante, este valor será utilizado en todo el dominio del reactor. Para el otro caso, con porosidad variable, se utiliza el modelo de porosidad en función del radio, propuesto por de Klerk [12], en la eq. 6.6, donde $h = (R_t - r)/d_p$, con $R_t = 20 \text{ [mm]}$ el radio del tubo y r la distancia desde el centro del tubo hasta el punto donde se evalúa la porosidad.

$$\epsilon(r) = \begin{cases} 2.14h^2 - 2.53h + 1; & h \leq 0.637 \\ \epsilon_b + 0.29 \exp(-0.6h) \cdot \cos(2.3\pi(h - 0.16)) + 0.15 \exp(-0.9h); & h > 0.637 \end{cases} \quad (6.6)$$

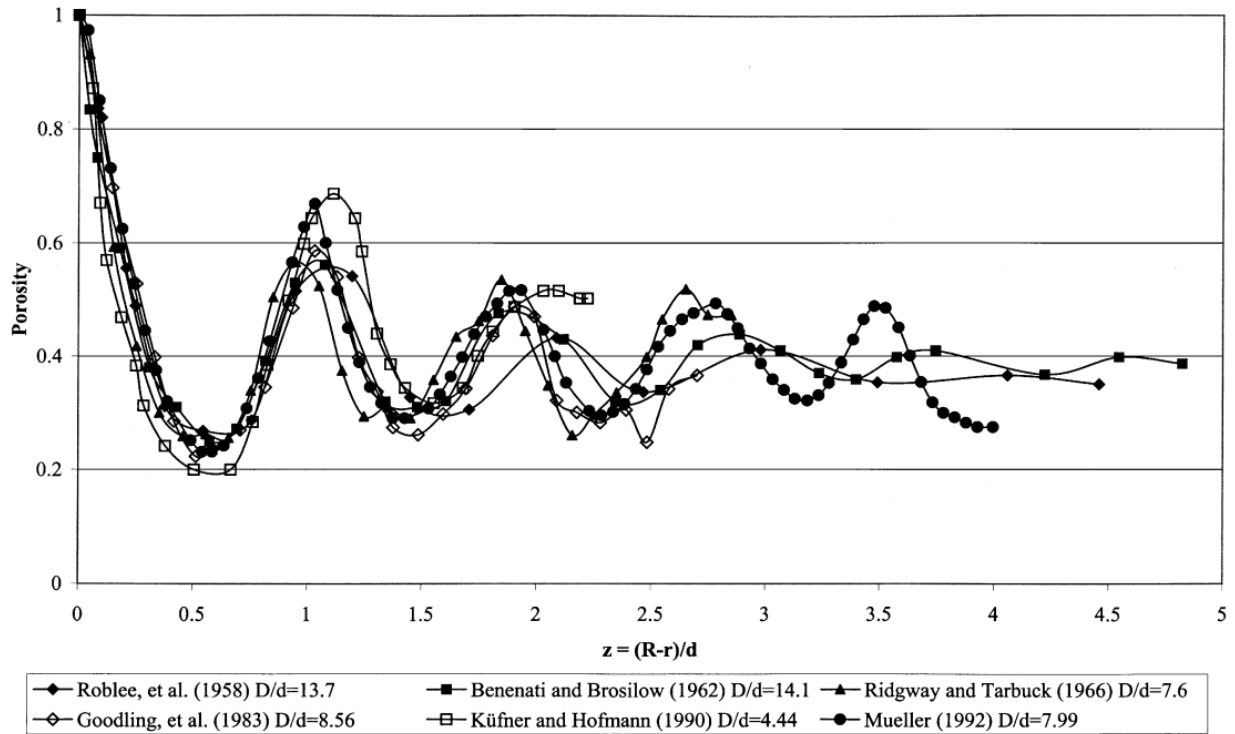


Figura 6.3: Estudios de variación radial de porosidad (Arno de Klerk, 2003) [12].

Para el reactor cilíndrico, que será simulado como un dominio rectangular en 2D, el valor de r es fácil de obtener para cualquier punto, pues es solo la distancia desde el eje de simetría, correspondiente a la coordenada x del punto (el eje de simetría coincide con el eje y del sistema de referencia). En el caso del codo, esta geometría corresponde a un cuarto de toro, por lo que es posible utilizar la ecuación 6.7, que describe la superficie de un toro con el eje z como eje de simetría, y $R_c = 200$ [mm] el radio desde el eje hasta el centro del área transversal, para obtener r .

$$r(x, y, z) = \sqrt{(R_c - \sqrt{x^2 + y^2})^2 + z^2} \quad (6.7)$$

Una vez obtenido el valor de r para todos los puntos del dominio, es posible utilizar la ec. 6.6 para calcular la porosidad en cada punto, donde la *bulk porosity* ϵ_b será calculada utilizando la ec. 6.5. El valor de porosidad calculado será utilizado también para calcular también los coeficientes de las ecuaciones 6.3 y 6.4.

El estudio se realizará, para todos los casos descritos, con tres números de Reynolds distintos:

$Re = 100; 200; 500$. Este número se calcula de forma distinta cuando se tiene medio poroso. En la ecuación 6.8, se presenta la definición clásica del número de Reynolds para flujo en una tubería, sin medio poroso, donde $D_t = 40 [mm]$ corresponde al diámetro del tubo. Por otro lado, en la ec. 6.9, se presenta el número de Reynolds para flujo a través de un lecho empacado, donde la longitud característica corresponde al diámetro de esfera, y además se multiplica por la porosidad. En ambos casos, la velocidad u corresponderá a la velocidad media del perfil de velocidad parabólico que se establece en la entrada.

$$Re = \frac{\rho_g \cdot u \cdot D_t}{\mu_g} \quad (6.8)$$

$$Re = \frac{\epsilon \cdot \rho_g \cdot u \cdot d_p}{\mu_g} \quad (6.9)$$

6.2. Cilindro recto

6.2.1. Sin medio poroso

El flujo a través de un cilindro, sin medio poroso, es un caso clásico de estudio en cursos de mecánica de fluidos, y tiene una solución conocida. Si el tubo es lo suficientemente largo, se alcanza un flujo desarrollado, esto es, que el perfil de velocidades ya no cambia a medida que avanza por el tubo, y tiene la forma $u(r) = u_{max}(1 - r^2/R^2)$. En la fig. 6.4 se presenta un caso, para $Re = 20$, para validar el método utilizado. En la entrada se fijó un perfil uniforme de velocidad, y se puede observar como este llega a la forma de un flujo desarrollado; el perfil de velocidad en 100, 200 y 300 mm es idéntico y se superponen en el gráfico. Se utiliza un Re pequeño para garantizar que el flujo se desarrolle en la tubería del largo presentado; para Re mayores, se requiere una tubería más larga, pero eventualmente se alcanza el flujo desarrollado.

6.2.2. Porosidad constante

Al agregar el medio poroso, el fluido ya no se ve afectado solo por las paredes de la tubería, si no por todas las paredes del medio poroso que encuentra en su camino. Esto produce que el flujo se desarrolle de forma distinta: ya no alcanzará un perfil parabólico, si no uno

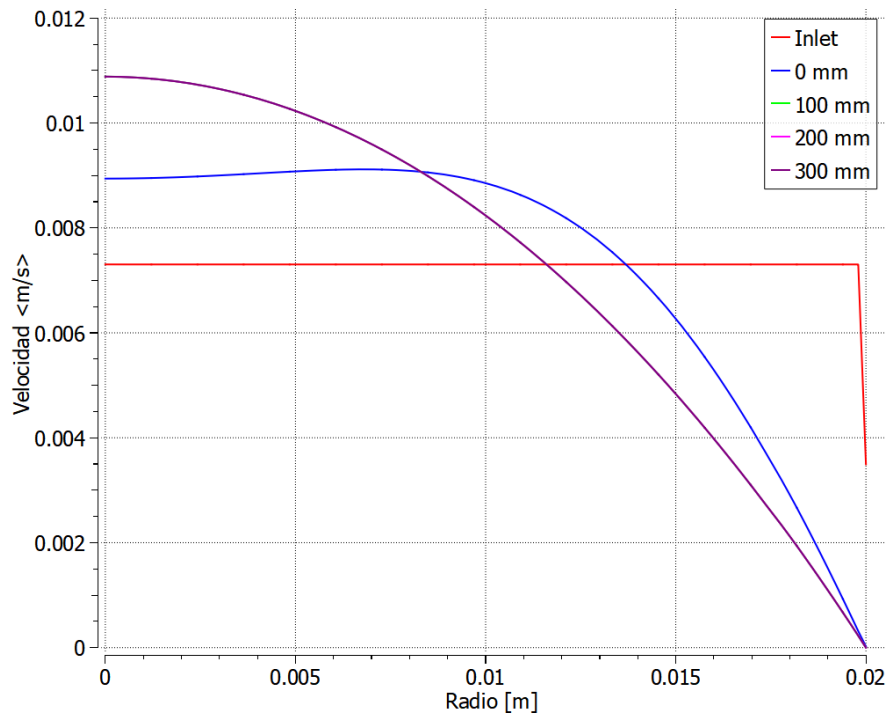


Figura 6.4: Perfiles de velocidad para un cilindro recto sin medio poroso, con $Re = 20$.

más uniforme, debido a la dispersión que ocurre en los poros. Huang (1996) determinó que, mientras más bajo sea el número de Darcy $\sigma^2 = \alpha/D_t^2$, se obtiene un perfil desarrollado más plano¹ [25]. Para un $\sigma^2 = 10^{-4}$, Huang obtiene que, independiente del perfil de entrada, se alcanza un perfil desarrollado con un valor uniforme (a excepción de las zonas muy cercanas a la pared).

Utilizando la ec. 6.3 y el diámetro de 40 [mm] del tubo, es posible calcular el número de Darcy, obteniendo un valor de $\sigma^2 = 10^{-5}$, por lo que es de esperar que el perfil se desarrolle de la misma forma. En la fig. 6.5 se presentan el desarrollo del flujo para $Re = 100, 200, 500$, con una porosidad constante a lo largo del reactor $\epsilon = 0.3755$, calculada con la ec. 6.5. La curva roja corresponde al perfil de velocidades fijado en la entrada, que tiene la forma de perfil desarrollado en un cilindro. Las siguientes curvas están señaladas en base a su distancia desde el inicio de la zona con medio poroso; la curva azul corresponde al inicio de esta, por lo que aún no está desarrollado, pero se puede observar la influencia de la fase sólida. Para los siguientes perfiles, en 100, 200 y 300 mm, ya se ha alcanzado un perfil desarrollado, y es difícil distinguir las tres curvas entre sí, pues presentan la misma distribución de velocidades. El perfil desarrollado es similar al obtenido por Huang, lo que sirve como validación adicional

¹En el artículo de Huang, se escribe como $\sigma^2 = K/h^2$, con K la permeabilidad del medio y h el ancho del canal. Se realiza el cambio de letras para mantener una nomenclatura consistente a lo largo de este trabajo.

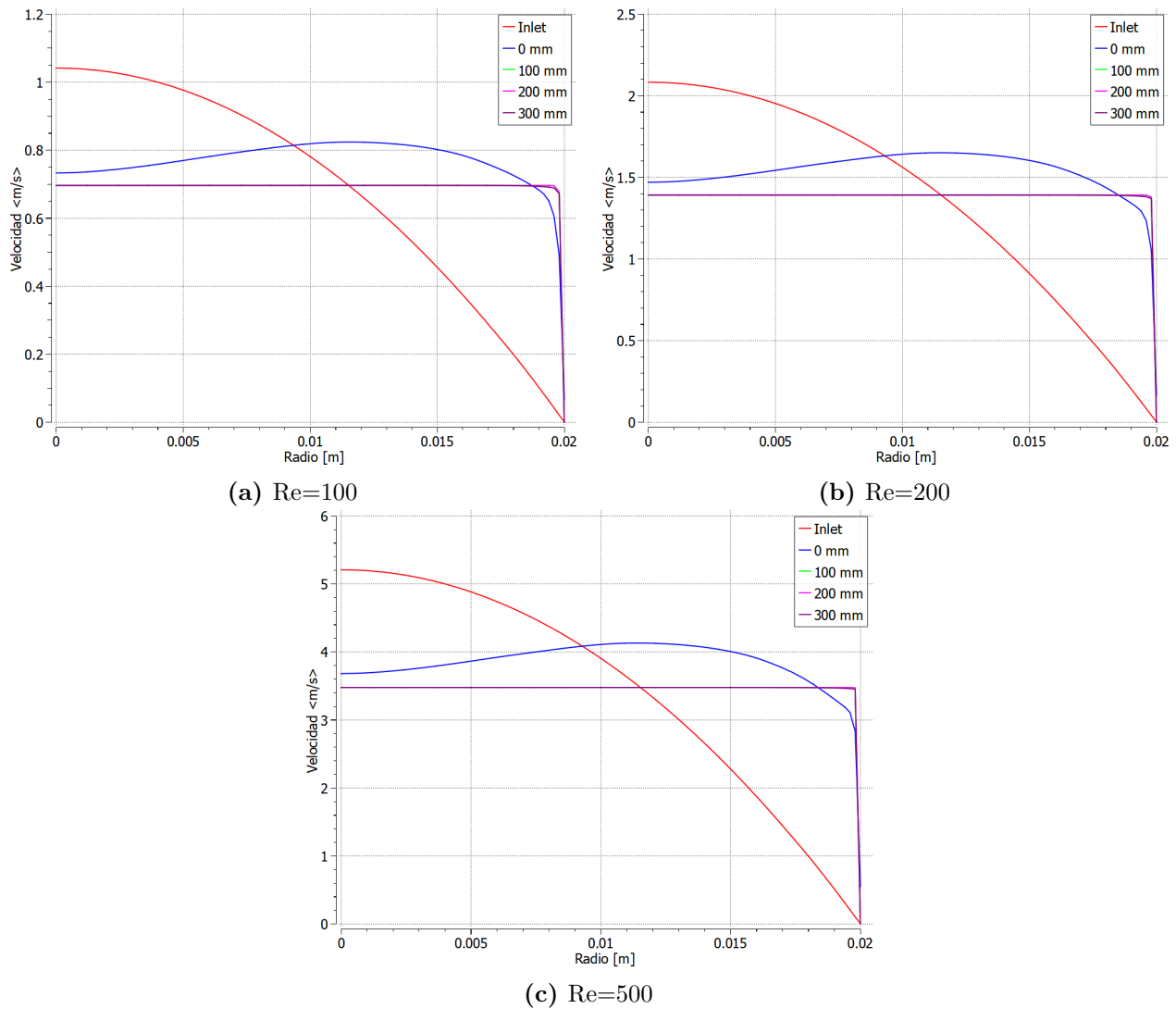


Figura 6.5: Desarrollo del perfil de velocidad para un cilindro con porosidad constante.

para el modelo. Además, para los tres Re , el comportamiento es el mismo, y solo cambia la magnitud de la velocidad.

6.2.3. Porosidad variable

Se utilizó el modelo de porosidad variable en función del radio presentado en la ecuación 6.6. Cerca de las paredes la porosidad es máxima, con valores cercanos a $\epsilon = 1$, es decir, no hay solido, y después este valor disminuye a medida que se acerca al centro del reactor. En la fig. 6.6, se presenta el desarrollo de los perfiles de velocidad obtenidos con este modelo, para los distintos Re . Los perfiles de velocidad son claramente distintos a los obtenidos para

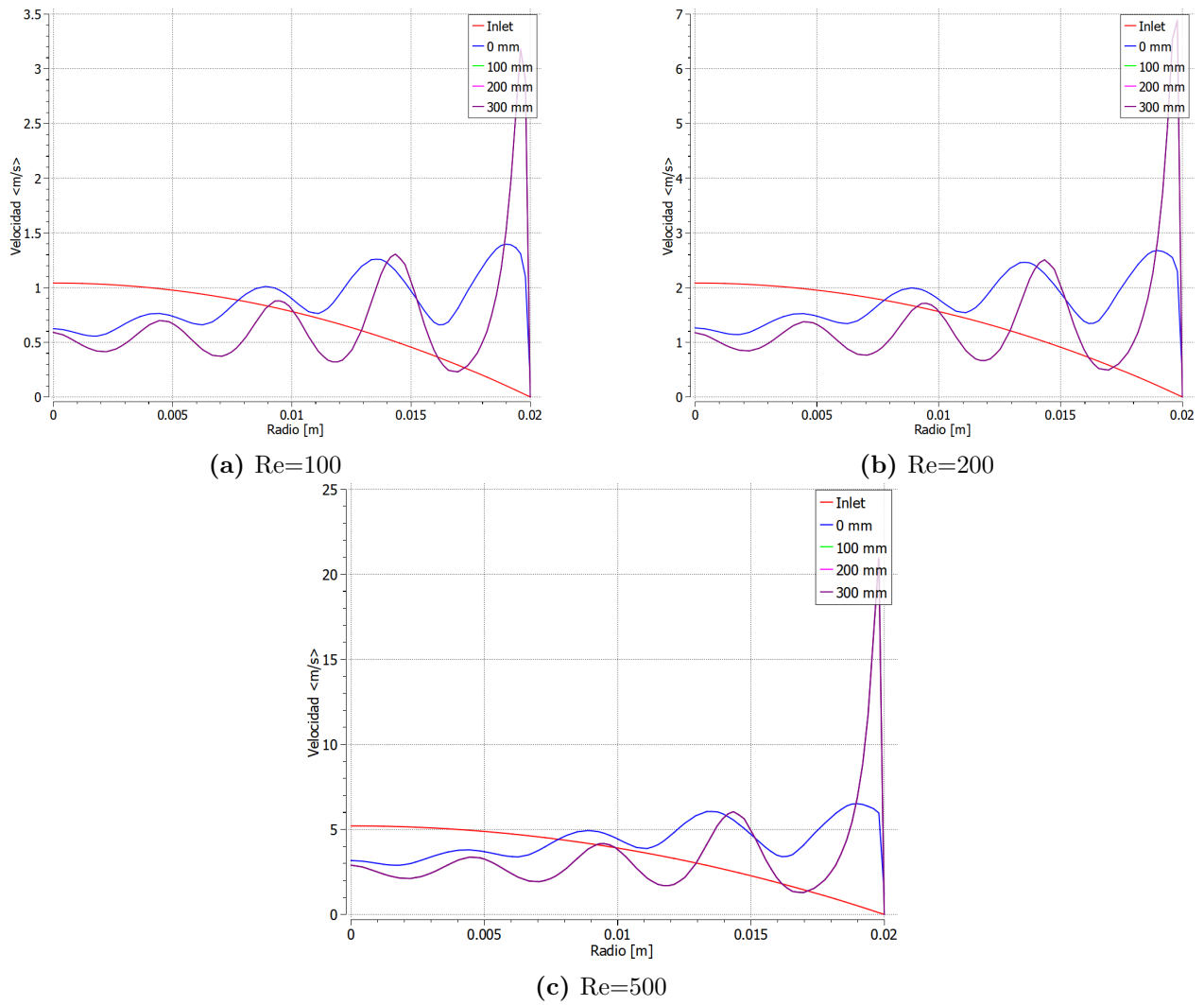


Figura 6.6: Desarrollo del perfil de velocidad para un cilindro con porosidad variable radialmente.

un modelo de porosidad constante, y se observa como, en las zonas donde hay una mayor porosidad, la velocidad es también mayor, debido justamente a que existe una menor porción de fase sólida que entorpece el movimiento del flujo de gas. Respecto al desarrollo del flujo, se comporta de forma similar al caso con porosidad constante: el flujo parabólico de entrada se ve alterado cuando entra en contacto con el medio poroso (curvas azules), y a los 100 mm ya se ha alcanzado un perfil desarrollado, pues esta curva coincide con las curvas de 200 mm y 300 mm.

6.3. Codo de 90°

6.3.1. Sin medio poroso

Los resultados de Taibi et al. (2021) para $Re = 500$ se presentan en la fig. 6.7. La fig. (a) corresponde al perfil de velocidad en los 90° del codo; en el eje x, $r/D = -0.5$ representa la curva interior del codo, $r/D = 0$ la línea central, y $r/D = 0.5$ la curva exterior. Se tienen tres curvas, donde $Ro = R_c/R_t$ representa la relación entre el radio del curvatura y el radio del tubo: un menor Ro representa un mayor De , por lo que el cambio de perfil de velocidad será más pronunciado. En la fig. 6.7 (b) se presentan contornos de la magnitud de la velocidad a lo largo del reactor, y una sección transversal a los 90°, correspondiente a la salida del tubo.²

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para este trabajo. En primer lugar, para el codo sin medio poroso, en la fig. 6.8 se presentan las líneas de corriente en la sección transversal del codo, a la salida de este. A diferencia de la fig. 6.1, en este caso el plano de simetría del codo está orientado verticalmente. En esta figura, es posible observar los vórtices de Dean que se forman para cada Re y De . Es importante notar que la geometría del codo es la misma para todos los casos, por lo que, según la ec. 6.1, De es directamente proporcional a Re . Para De bajos, se observa que los vórtices tienen una forma muy definida y simétrica. Con $De = 158.1$, comienzan a aparecer deformaciones en estos, pero manteniendo una simetría y estructura. Adicionalmente, para enfatizar en la importancia del número de Dean en tubos curvos, se presentan las líneas de corriente para $Re = 2000$ y $De = 632.4$, donde puede observarse que los vórtices están deformados y aparecen estructuras de vórtices secundarios, transicionando hacia un régimen más turbulento.

²Se omite la escala de colores, pues se presenta solo con fines ilustrativos. Los colores más cálidos representan una mayor magnitud de velocidad.

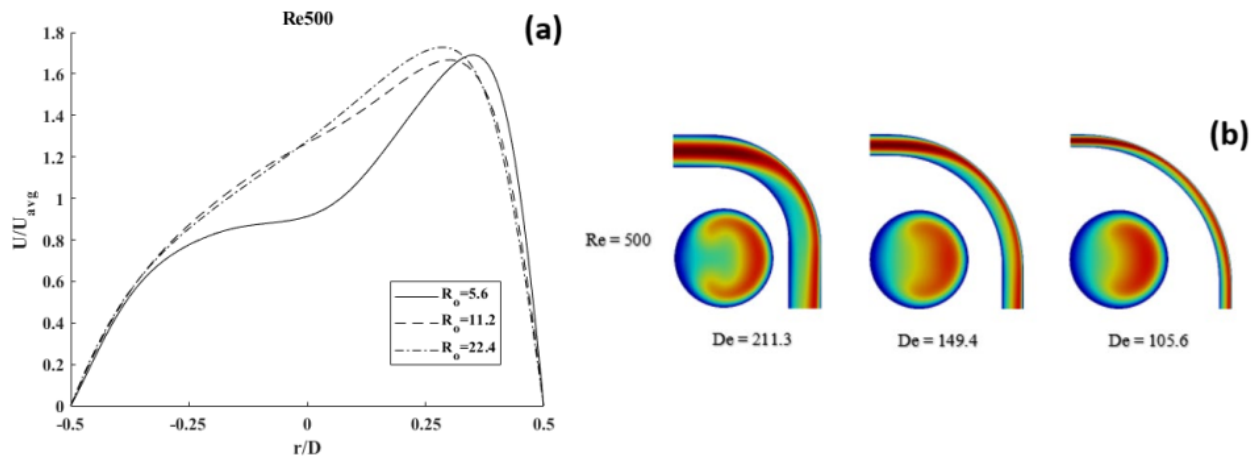
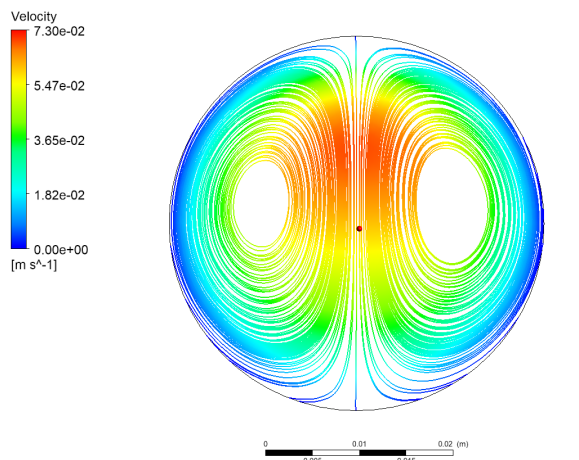


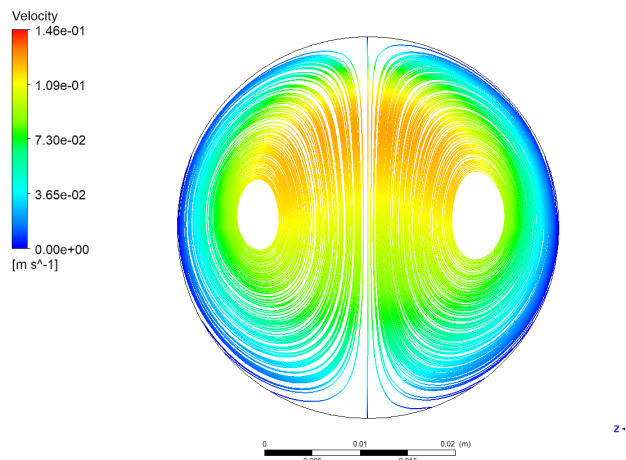
Figura 6.7: Resultados de Taibi et al. (2021) para $Re = 500$ [41]. (a) Perfil de velocidad en la salida del codo. (b) Contornos de velocidad a lo largo del codo.

En la fig. 6.9, se presentan contornos de velocidad en el plano de simetría del codo. En estas figuras, la entrada de flujo es por la parte inferior, y este circula en sentido anti-horario hasta recorrer los 90° del codo. Se observa como la zona de máxima velocidad, en lugar de seguir la línea central del codo, se desvía hacia la curva exterior. Este comportamiento se hace más pronunciado a medida que aumenta Re , demostrando los efectos explicados por Dean. Es posible observar un buen contraste con los resultados obtenidos por Taibi et al. [41] presentados en la fig. 6.7, donde se observa un comportamiento similar respecto al desplazamiento de las zonas de máxima velocidad a medida que se avanza en el codo (notar que, en la imagen 6.7 (b), el flujo entra por la parte superior del codo y lo recorre en sentido horario).

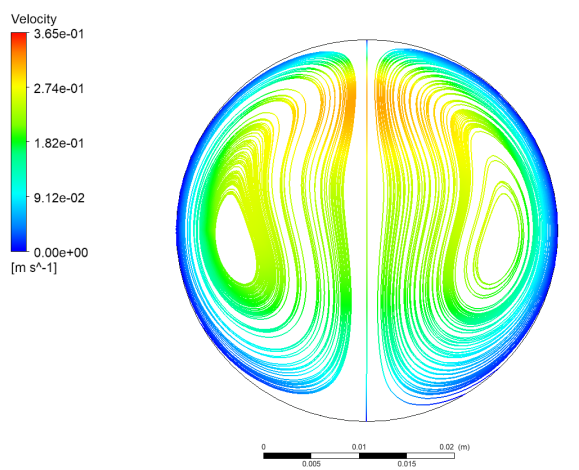
Finalmente, se presenta la evolución de los perfiles de velocidad a lo largo del codo, para los tres números de Reynolds estudiados, en la fig. 6.10. Para todos los casos, se comienza con un perfil de velocidad parabólico, y a medida que avanza a lo largo del codo, el punto de máxima velocidad se desplaza hacia afuera. Notar que, en este caso, las distintas curvas no están representadas por una distancia lineal como en el cilindro, si no que cada una corresponde a un ángulo respecto a la entrada del reactor. Para $De = 31.6$, el perfil mantiene una forma similar a una parábola, pero para $De = 63.2$ y 158.1 , cambia de forma, presentando un máximo más marcado hacia afuera. Para este caso, no se alcanza un flujo desarrollado, pues es posible ver como el perfil de velocidad sigue evolucionando a medida que se avanza,



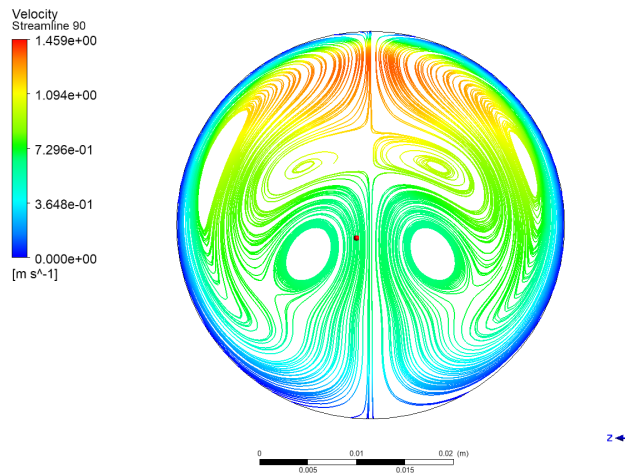
(a) $Re=100, De=31.6$



(b) $Re=200, De=63.2$

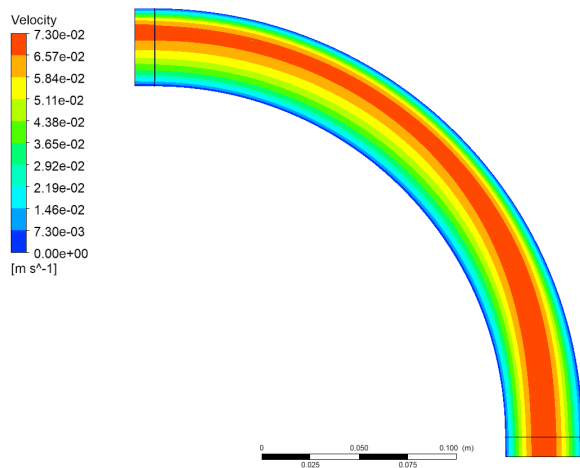


(c) $Re=500, De=158.1$

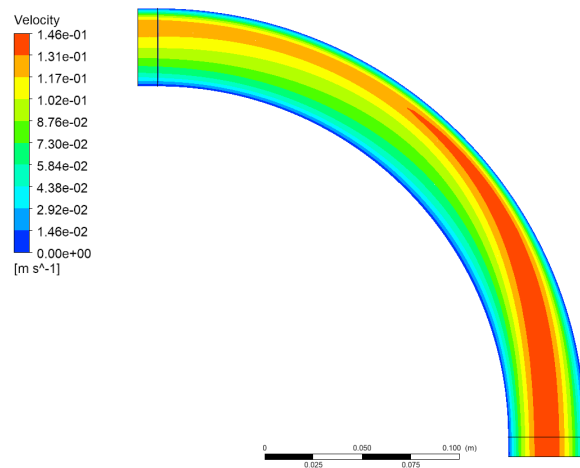


(d) $Re=2000, De=632.4$

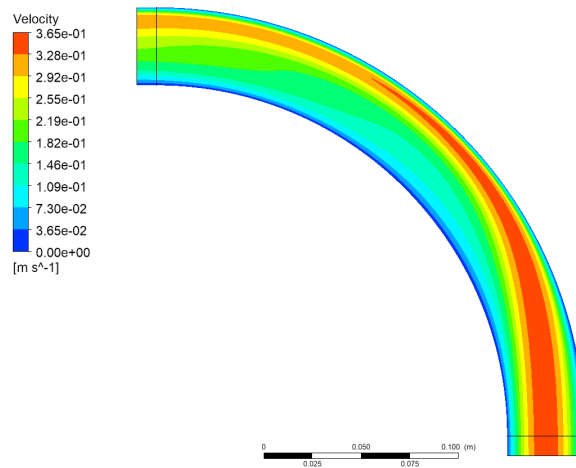
Figura 6.8: Líneas de corriente en la salida de un codo sin medio poroso.



(a) $Re=100$, $De=31.6$



(b) $Re=200$, $De=63.2$



(c) $Re=500$, $De=158.1$

Figura 6.9: Magnitud de velocidad a lo largo de un codo sin medio poroso.

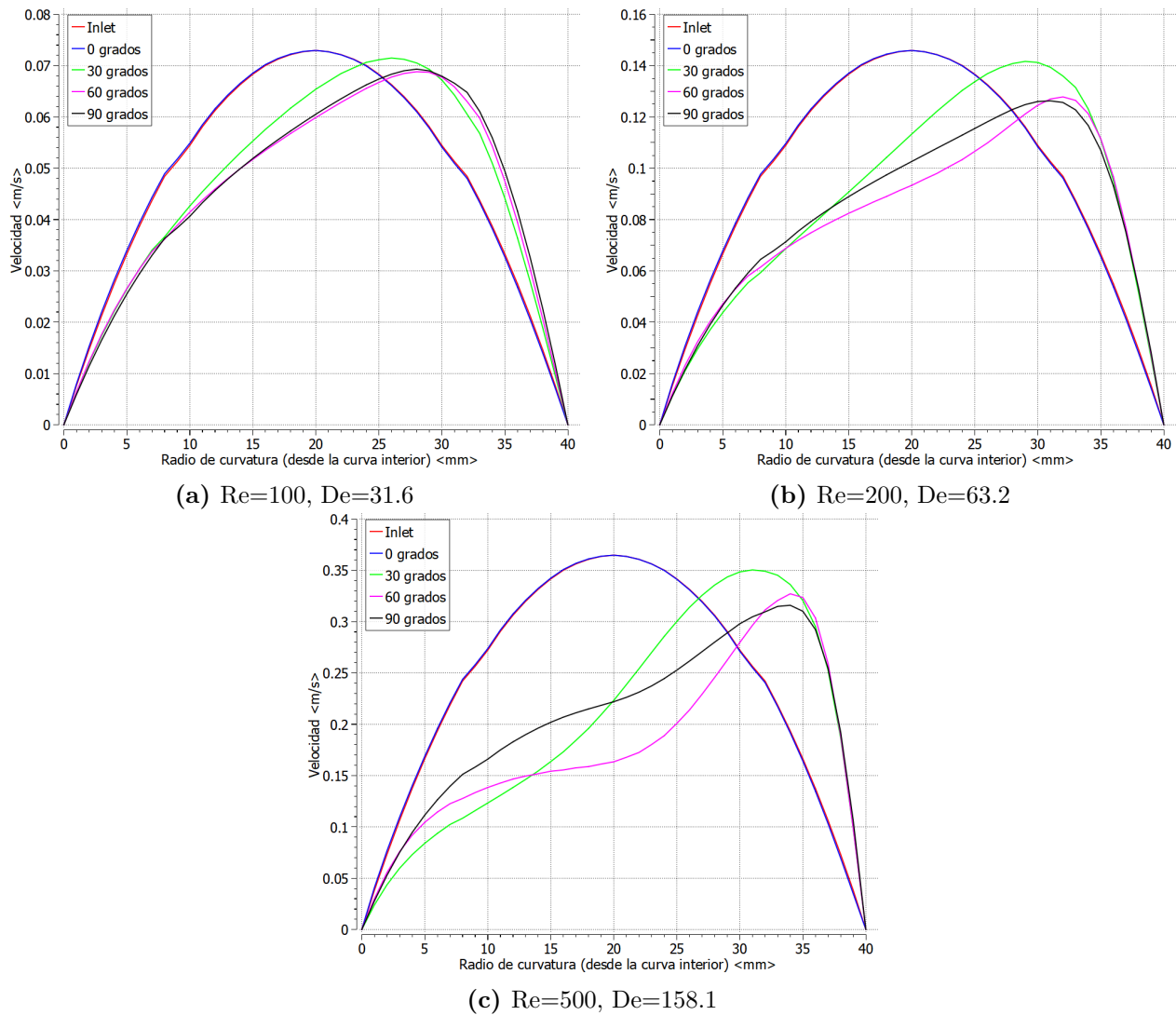


Figura 6.10: Desarrollo de perfil de velocidad para un codo sin medio poroso.

y estos no coinciden, como si ocurrió para el cilindro recto. Los resultados de Taibi et al. nuevamente pueden ser utilizados para una comparación, en este caso, la fig. 6.7 (a), donde se presenta el perfil de velocidad a la salida. Para un menor R_o , y por lo tanto un mayor De , el cambio en el perfil de velocidad se hace más pronunciado.

El contraste con los resultados de investigaciones previas, permite validar el modelo computacional utilizado. Con el modelo validado, es posible estudiar cómo afecta el medio poroso al flujo en una curva, que como ya ha sido señalado, no ha sido estudiado con anterioridad.

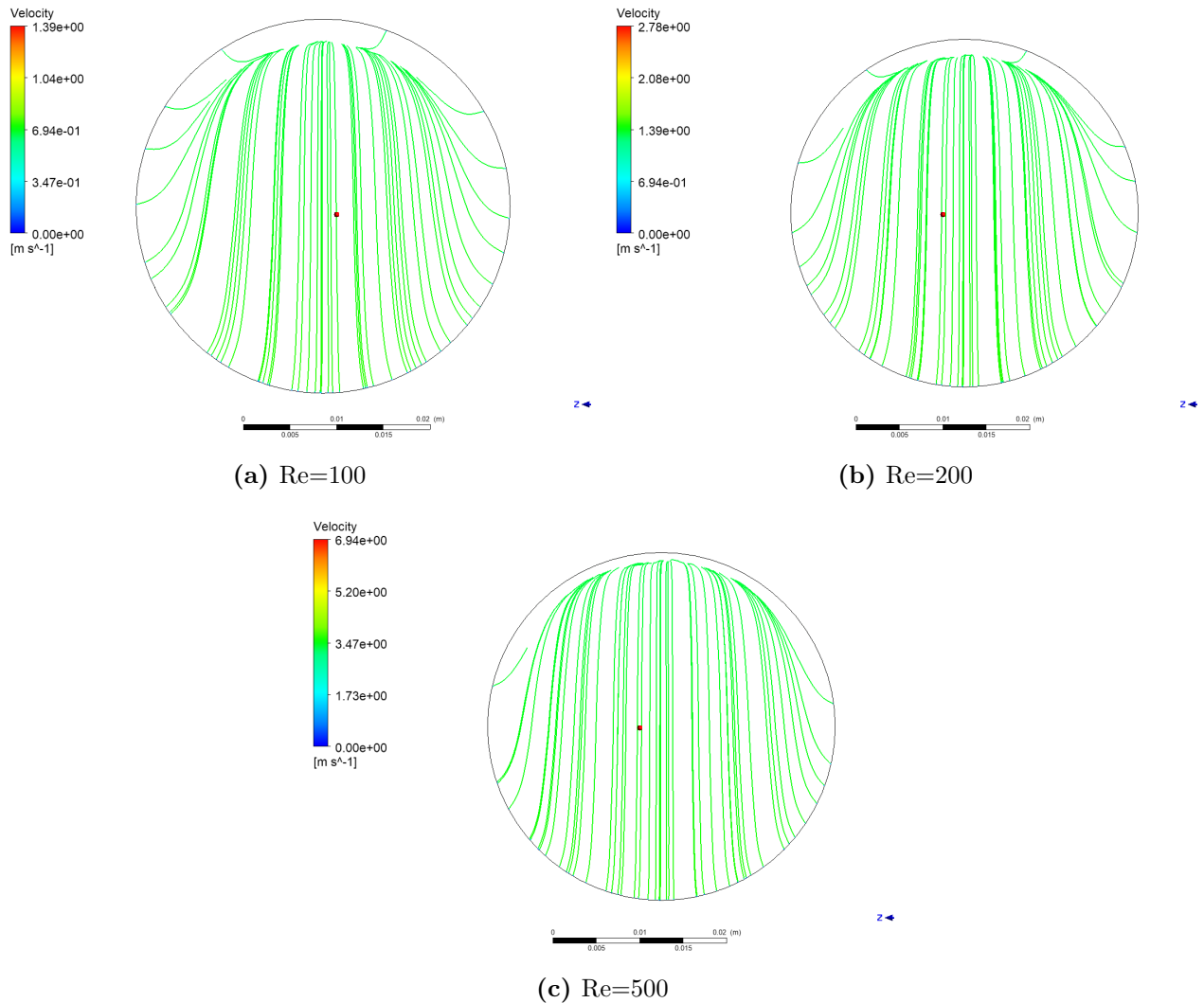


Figura 6.11: Líneas de corriente en la salida de un codo con porosidad constante.

6.3.2. Porosidad constante

La porosidad se calcula de la misma forma que fue calculada para el cilindro recto, utilizando la ec. 6.5, obteniendo $\epsilon = 0.3755$. En la fig. 6.11 se presentan las líneas de corriente para el codo con porosidad constante. En este caso, no se forman los vórtices de Dean, debido a la presencia del sólido, que se interpone en el camino del fluido. No es posible obtener mucha información de estas líneas de corriente, por lo que no se ahonda en su análisis.

Los contornos de velocidad se presentan en la fig. 6.12. Estos resultados son un poco más

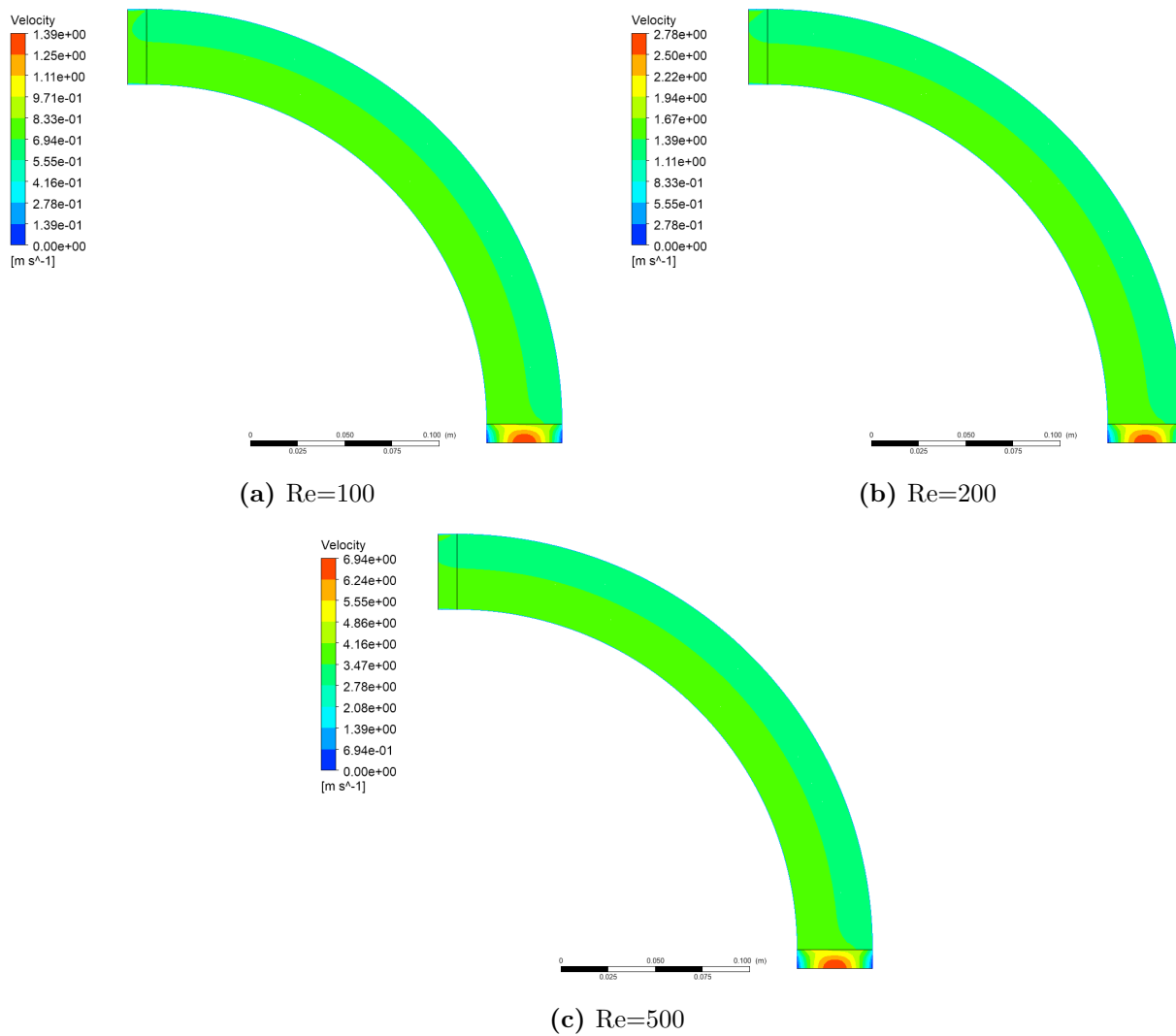
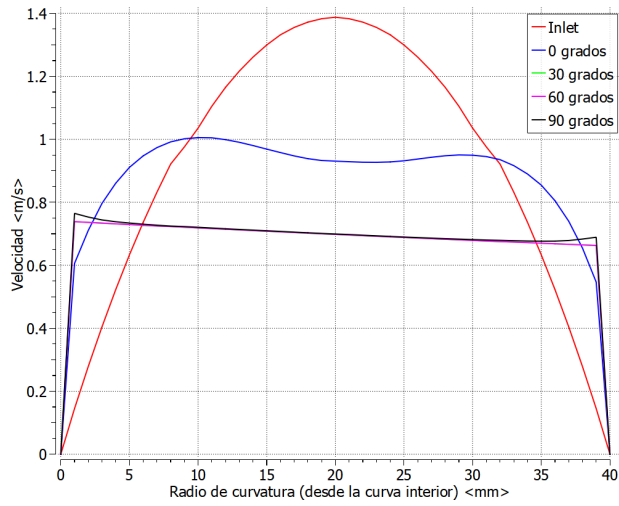
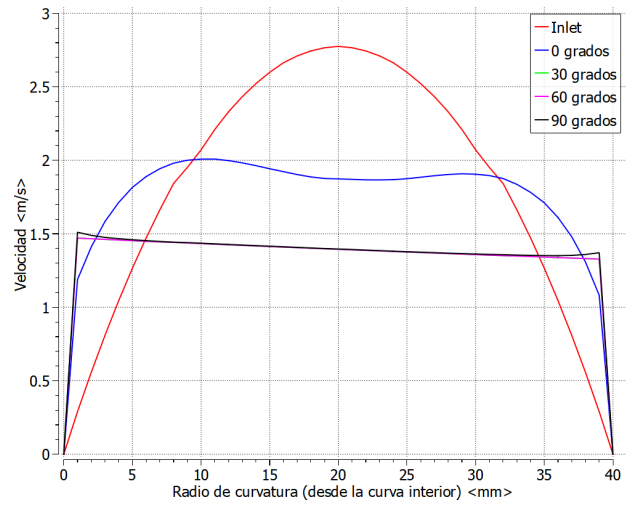


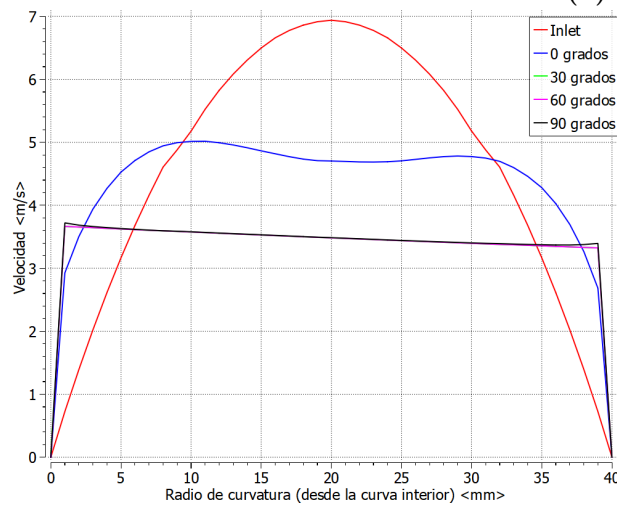
Figura 6.12: Magnitud de velocidad a lo largo de un codo con porosidad constante.



(a) $Re=100$



(b) $Re=200$



(c) $Re=500$

Figura 6.13: Desarrollo de perfil de velocidad para un codo con porosidad constante.

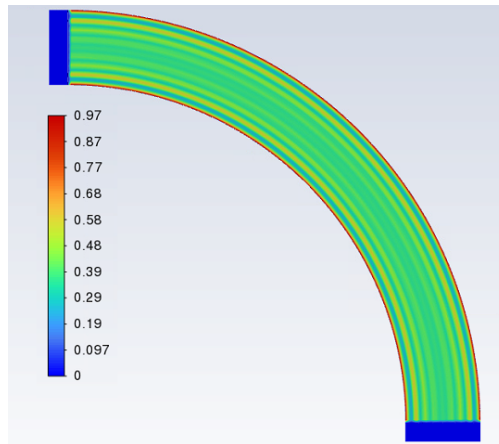


Figura 6.14: Porosidad como función del radio en un codo de 90° .

interesantes, pues muestran que, a pesar de la distribución parabólica de velocidad a la entrada, que se ve representada por el gradiente de colores en la parte inferior de las figuras, al entrar en la zona de medio poroso, la distribución de velocidad es mucho más uniforme, obteniéndose valores muy cercanos entre sí a lo largo y ancho del reactor. Es posible ver un cambio de color, que indica velocidades levemente superiores en la zona cercana a la curva interior del reactor. Al comparar este comportamiento al de la fig. 6.9, se observa que la presencia del medio poroso anula la influencia de la curva y la fuerza centrífuga asociada a esta sobre el flujo, logrando una distribución de velocidad mucho más uniforme y eliminando el máximo de velocidad cercano a la curva exterior presente en un codo sin sólido. Esta observación se ve reforzada por el desarrollo de los perfiles de velocidad presentados en la fig. 6.13; el flujo de entrada (curva roja) se ve modificado apenas entra en contacto con la fase sólida (curva azul), y a medida que avanza, se desarrolla como un perfil más uniforme y recto. A diferencia del codo sin medio poroso, en este caso si se alcanza un perfil de velocidades desarrollado, pues se observa que los perfiles para 30° , 60° y 90° coinciden.

6.3.3. Porosidad variable

El último caso a ser estudiado es el del codo con una porosidad variable en función del radio, calculada en base a la ecuación 6.6. En la fig. 6.14, se presenta la distribución de porosidad a lo largo del codo; se observan zonas de porosidad cercana a 1 (que corresponde a únicamente fluido) cerca de las paredes, mientras que hacia el centro del reactor se estabiliza en un valor

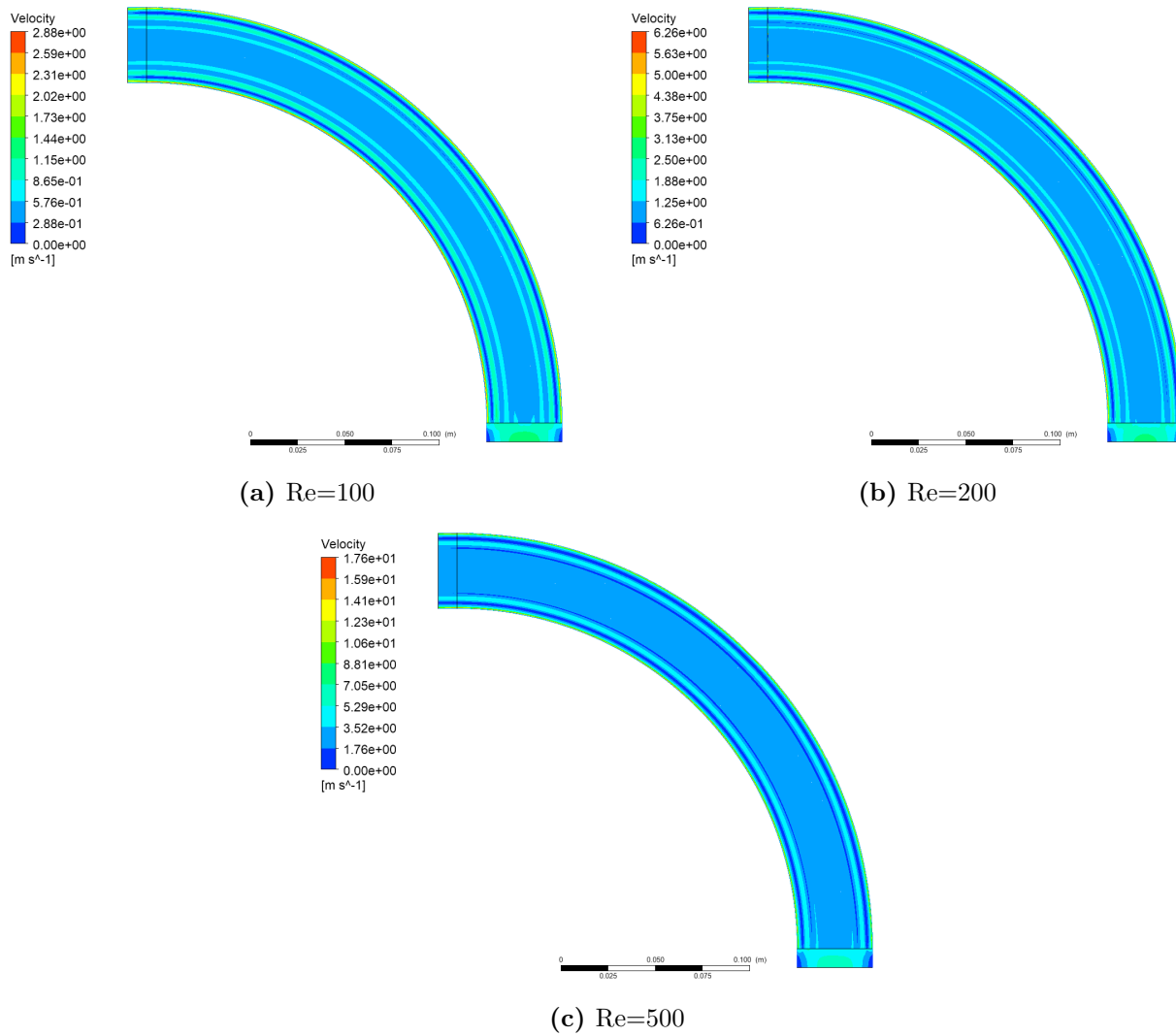
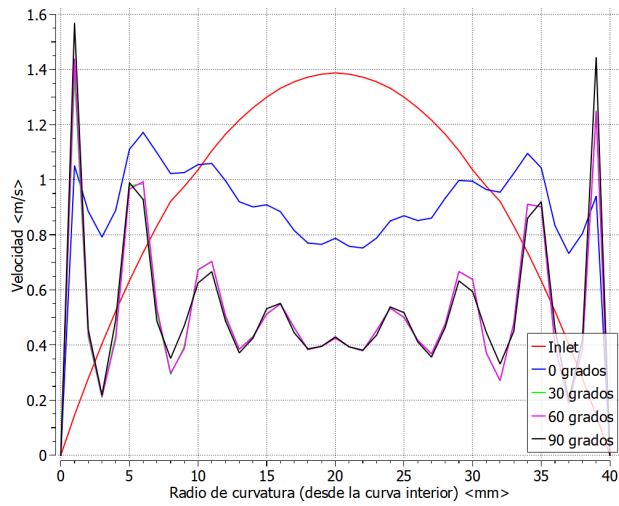


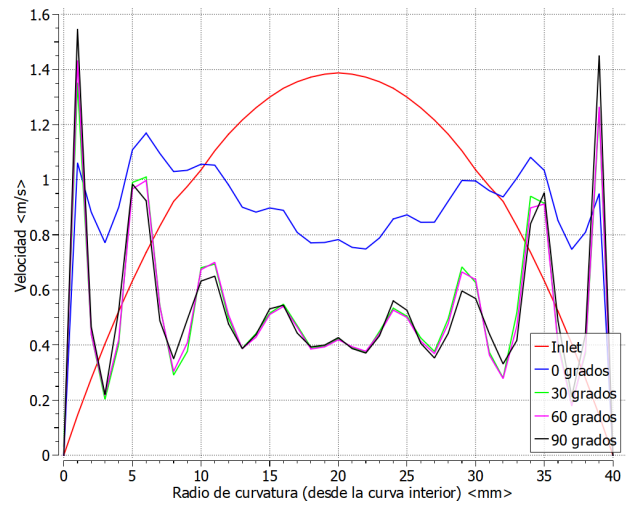
Figura 6.15: Magnitud de velocidad a lo largo de un codo con porosidad variable en función del radio.

intermedio³. En este caso, no se presentan las líneas de corriente en la cara de salida, porque como se vió en el caso anterior, no aportan mucha información. En la fig. 6.15, se presenta la distribución de velocidad. En este caso, se observa que, al compararlo a la fig. 6.9, la distribución es mucho más uniforme con el medio poroso, pero esta vez, a diferencia de la fig. 6.12, se distribuye en bandas o líneas, relacionado con la distribución de porosidad. Esto puede apreciarse de forma más clara en la fig. 6.16. Una vez más se observa cómo el perfil de velocidad de la entrada se modifica cuando entra en contacto con el medio poroso. La distribución de velocidad en este caso no es uniforme, si no que se relaciona con la porosidad: en las zonas donde la porosidad es mayor, es decir, hay menor cantidad de sólido y por lo tanto mayor espacio para que se mueva el gas, la velocidad también es mayor, de la misma forma que ocurrió para el cilindro recto con porosidad variable en función del radio, presentado en la fig. 6.6. Respecto al desarrollo del perfil, se observa nuevamente, que la presencia del medio poroso facilita alcanzar un perfil desarrollado, pues los perfiles en 30°, 60° y 90° son casi idénticos, esto gracias a la mayor dispersión que se alcanza con el medio poroso, que fuerza al gas a moverse por los poros. Por último, es interesante notar que, nuevamente, los perfiles de velocidad no son perfectamente simétricos, sino que el flujo que viaja más cercano a la curva interior del codo (correspondiente al lado izquierdo de las fig. 6.13 y 6.16) tiene una velocidad ligeramente mayor al flujo que viaja por zonas con un mayor radio de curvatura. Adicionalmente, la fig. 6.16 (a) y (b), ambas corresponden a $Re = 100$, con la diferencia de que, para (b), se añadió ruido a la porosidad. Se utilizó el mismo modelo de porosidad variable en función del radio, pero adicionalmente, se añadió un término aleatorio a la porosidad en cada punto del reactor, que hace que esta varíe levemente respecto a la ec. 6.6, con el objetivo de representar un poco mejor lo que ocurriría en un lecho empacado real, donde las esferas pueden presentar irregularidades superficiales, o estas pueden no estar perfectamente acomodadas para mantener el modelo utilizado. Se observa que, si bien existen cambios entre (a) y (b), como que los perfiles en 30° y 60° ya no coinciden perfectamente, el comportamiento o la tendencia es la misma, y las pequeñas variaciones en la porosidad no afectan en el análisis realizado.

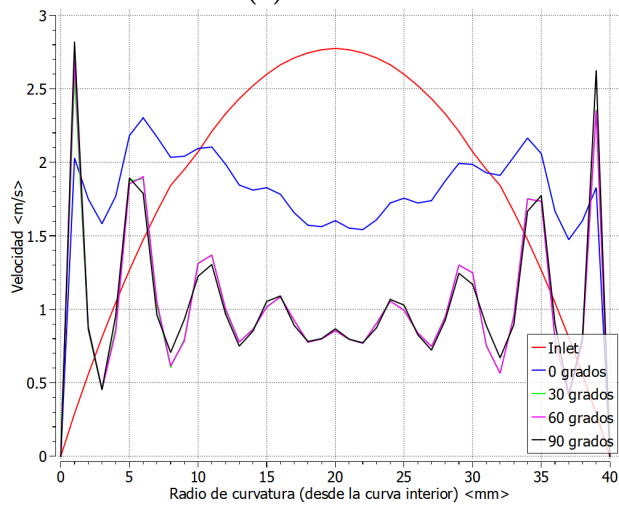
³Los cuerpos de inlet y outlet aparecen con porosidad 0, lo que significaría que son completamente sólidos. Esto ocurre por la forma en que se definió la función para calcular la porosidad, pero en la simulación de Fluent, ambas zonas están definidas como fluido sin medio poroso, por lo que la función de porosidad no se aplica en estas zonas.



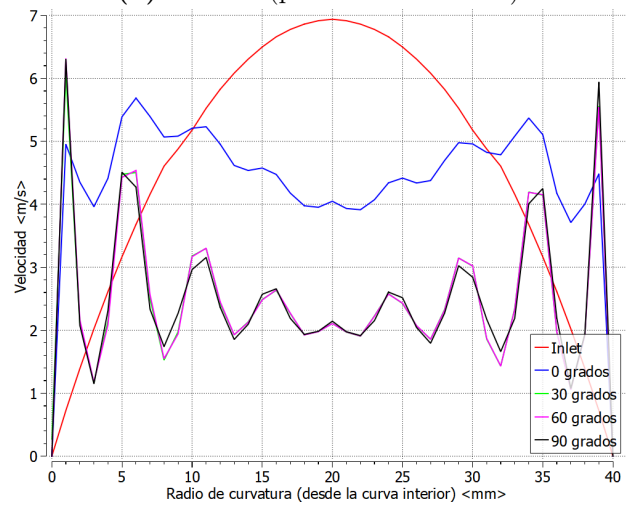
(a) $Re=100$



(b) $Re=100$ (porosidad con ruido)



(c) $Re=200$



(d) $Re=500$

Figura 6.16: Desarrollo de perfil de velocidad para un codo con porosidad variable en función del radio.

6.4. Análisis de los resultados

Se estudiaron seis casos distintos. El más simple corresponde a un cilindro recto, sin medio poroso, presentado en la fig. 6.4, hasta llegar al más complejo, que vendría a ser el codo con medio poroso. En el primero, el fenómeno es simple: el perfil de velocidad se desarrolla hasta alcanzar un perfil parabólico, lo que podríamos considerar como la base del movimiento del flujo a través de una tubería. En el codo con medio poroso, se añaden dos efectos, que modifican el comportamiento base del cilindro recto, y que pueden ser estudiados por separado. El primero de estos efectos es el del medio poroso, introducido en las fig. 6.5 y 6.6, que produce una mayor dispersión del flujo a lo ancho del reactor, disminuyendo así el efecto de las paredes del tubo, obteniendo un perfil de velocidad que depende de la porosidad en cada zona, además de un flujo que se desarrolla rápidamente. El otro efecto es el de la fuerza centrífuga producida por la curva, que fue descrito por Dean [11], en el que se genera un movimiento secundario del flujo en un plano normal a la dirección del flujo, en forma de vórtices, que modifican el perfil de velocidad, desplazando el valor máximo de velocidad desde el centro del tubo hacia la curva exterior, como se presentó en las figuras 6.8-6.10; además, la curva no permite alcanzar un perfil desarrollado (que no presente cambios en la dirección del flujo) a lo largo del codo. Ambos efectos se estudiaron por separado, para ser finalmente combinados, en las fig. 6.11-6.16. De esto, se determinó que el fenómeno que predomina es el efecto producido por el medio poroso, eliminando el efecto de la curva y de los vórtices de Dean. Así, para el flujo en un codo de 90° , se alcanza rápidamente un perfil de velocidades desarrollado, y la distribución de este depende principalmente de la porosidad.

Hay que recordar que este trabajo busca estudiar el proceso de combustión en medio poroso inerte, en una geometría curva, con forma de codo de 90° . Si bien para el enfoque computacional se ha dejado de lado el proceso de combustión, estudiando un flujo no reactivo, con únicamente aire, el objetivo de este estudio es complementar o explicar el proceso de combustión descrito en el capítulo anterior. En base a lo que se ha descubierto del enfoque computacional, es posible entender por qué el frente de combustión se comporta de la forma estudiada en el enfoque experimental. Debido a que la velocidad del flujo depende principalmente de la porosidad, y no del radio de curvatura, además de desarrollarse cerca de la entrada al medio poroso, es que el frente puede propagarse a lo largo de la curva, manteniéndose unido como un único frente de combustión de forma estable; el frente no se ve empujado o retrasado por el flujo en gran medida en ninguna zona. El flujo mantiene una velocidad

independiente del radio de curvatura, pero el flujo y la onda de combustión deben viajar una mayor distancia en el lado exterior que en el interior. La diferencia es leve, debido a que el radio del tubo es pequeño en relación al radio de curvatura del codo, sin embargo, se hace notar, en las fig. 5.4-5.6: la onda de combustión, identificada por los picos de temperatura, siempre llega antes a las termocuplas ubicadas en el interior, seguidas por la central y después la exterior. Este comportamiento se explica justamente por una velocidad de filtración similar en las líneas interior y exterior del reactor, pero con una distancia por cubrir levemente mayor en la línea exterior. Se hace énfasis en que esta diferencia es pequeña, y no afecta en la estabilidad o propagación de la llama, como se demostró en la parte experimental de este trabajo.

Existe otro fenómeno, observado en el enfoque experimental y que puede ser explicado a partir del enfoque computacional, que para el ojo inexperto puede pasar desapercibido, pero de gran importancia para el desempeño del reactor. En las fig. 6.13 y 6.16, se observa que las velocidades son levemente superiores en el lado izquierdo de los gráficos, lo que corresponde a la curva interior del codo. Esto, además de poder explicar por qué la onda de combustión alcanza primero las termocuplas de la línea interior en las fig. 5.4-5.6, permite explicar además las temperaturas alcanzadas. En la sección 5.4.1, se señaló que la termocupla central es la que alcanza una mayor temperatura, seguida de la interior, y finalmente la exterior. Es lógico que la termocupla central sea la que alcance la mayor temperatura, pues está rodeada de medio poroso, y alejada de las paredes del reactor, por donde ocurren las pérdidas de calor, pero no se presentó una explicación de por qué las termocuplas interiores y exteriores presentaban una diferencia. Con el enfoque computacional, es posible explicar esto desde la hidrodinámica: una mayor velocidad en la línea interior del reactor, se traduce en un mayor flujo másico, lo que conlleva una mayor cantidad de combustible, aumentando el grado de reacción y por lo tanto, la temperatura en esa zona. Esta mayor temperatura en la línea interior a su vez explica la diferencia de temperaturas superficiales observadas con la cámara térmica, en las fig. 5.9 y 5.10, lo que permitió calcular mayores pérdidas de calor del reactor por la cara interior del codo.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones para la continuidad

7.1. Conclusiones

En base a los resultados presentados en los capítulos 5 y 6 de este trabajo, fue posible cumplir los objetivos propuestos en el capítulo 2. En la revisión de la literatura, tanto para procesos de combustión como flujos no-reactivos, no se encontró información respecto a medios porosos en una curva. Así, este trabajo presenta una novedad, y permitirá dar luces sobre un fenómeno que no ha sido investigado con anterioridad. Se realizó un estudio numérico y experimental del comportamiento de un frente de combustión en un reactor de medio poroso inerte, de geometría curva tipo codo de tubería de noventa grados, y se obtuvieron resultados que permiten entender cómo se propaga la llama en una curva.

Para la parte experimental de este trabajo, se fabricó un reactor con forma de codo de 90 grados, con mediciones de flujo, temperatura y emisiones de gases, utilizando esferas de alúmina como medio poroso inerte. Para varias combinaciones de velocidad de filtración y relación de equivalencia para mezclas ultra-pobres de gas natural y aire, se determinó que es posible formar un frente de combustión en un reactor de MPI curvo, y además, puede propagarse a lo largo del reactor. Se determinó que la relación de equivalencia más baja, con la que se puede trabajar de forma estable y permitir que el frente viaje aguas abajo hasta la salida de este, es $\phi = 0.2$, por debajo del límite de flamabilidad de una llama libre. Aunque existen quemadores de MPI que operan con una relación de equivalencia menor, el objetivo de este trabajo no era buscar límites de operación ni optimizar parámetros, por lo que el $\phi = 0.2$

se considera un resultado muy satisfactorio. Para el frente de combustión desplazándose aguas abajo, se alcanzaron temperaturas de combustión superadiabáticas, con incrementos de temperatura incluso tres veces más grandes que los incrementos de temperatura para una llama libre adiabática en algunos casos. Con las tres líneas de termocuplas dentro del reactor, se observó que la temperatura es máxima en el centro del tubo, seguida por la zona cercana a la curva interior, y finalmente la curva exterior, con mayor radio de curvatura. Además, se calculan las pérdidas de calor del reactor hacia el ambiente a través de su superficie, demostrando que por la curva interior del reactor, con un menor radio de curvatura y menor área, las pérdidas de calor son mayores a las obtenidas en la curva exterior, esto debido a la diferencia de temperaturas dentro del reactor. Las emisiones de CO, NO y HC reportadas son muy bajas, lo que indica que ocurre un proceso de combustión completa en el quemador. Respecto al movimiento del frente de combustión, se concluye que este no viaja de forma perfectamente radial, pues existe un desfase entre los momentos en que las termocuplas de un mismo grupo, ubicadas en la misma posición angular, alcanzan su pico de temperatura. Al calcular las velocidades de desplazamiento del frente de combustión, se verifica que, cuando se disminuye la relación de equivalencia de combustible y/o aumenta la velocidad de filtración y flujo másico, aumenta la velocidad del frente de combustión. Si bien el desplazamiento no es perfectamente radial, se observa que la velocidad del frente de combustión es más alta para un radio de curvatura mayor, lo que indica que el frente de combustión sigue, en cierto grado, la forma de la curva, permitiendo que se desplace a lo largo de esta.

En la parte computacional de este trabajo, se realizó una simulación para un codo de tubería de 90°, con aire como fluido de trabajo, sin proceso de combustión, buscando explicar los fenómenos observados en la parte experimental del trabajo desde la dinámica de fluidos. Primero, se realizó una simulación en dos dimensiones de un cilindro recto, que permitió validar el modelo computacional al compararlo con la teoría y trabajos previos y determinar que, en presencia de un medio poroso, el perfil de velocidad depende principalmente de la distribución de la porosidad, y este permite que el flujo alcance un estado desarrollado rápidamente. Para la simulación del codo, se trabajó primero sin medio poroso, pudiendo observar la formación de vórtices en la sección transversal del codo, y un desplazamiento del perfil de velocidades hacia la curva exterior del codo, además de no alcanzar un perfil desarrollado. Estos resultados coinciden también con la teoría y estudios previos de flujo en codos, lo que valida una vez más el modelo y permite agregar un medio poroso al codo. Para esto, se utilizaron dos modelos, uno con porosidad constante, como una espuma cerámica, y uno con porosidad como función del radio, modelando el comportamiento de un lecho empacado de esferas. Para ambos casos, se determina que el fenómeno que domina en el

comportamiento del flujo es la presencia del medio poroso, eliminando los vórtices de Dean y anulando los efectos de la curva: la velocidad depende de la porosidad, y se obtiene un flujo desarrollado cerca de la entrada del codo. Esto permitió explicar el comportamiento del frente de combustión estudiado en la parte experimental: un flujo bien distribuido y casi uniforme en el reactor, posibilita que el proceso de combustión sea estable, lo que favorece que la llama se propague de forma similar a lo que se observa en un reactor recto, pero siguiendo aproximadamente la forma de la curva. Por último, la diferencia de temperatura entre las zonas cercanas a la curva interior y exterior, se debe a que el flujo no es perfectamente simétrico, y existe una velocidad ligeramente mayor cerca de la curva interior, lo que explica su mayor temperatura, y a su vez, las mayores pérdidas de calor por dicha zona. Ahora que se tiene conocimiento y se entiende cómo se comporta el frente de combustión en una curva, es posible avanzar en el desarrollo de un reactor de medio poroso inerte circular.

7.2. Recomendaciones para trabajos futuros

Este trabajo se enmarca en el proyecto Fondecyt de Exploración 13240110, que busca crear un nuevo modelo de reactor, con geometría circular. El estudio del frente de combustión en una curva es el primer paso de este camino; para quien quisiera continuar con este proyecto, el autor recomienda las siguientes líneas de trabajo:

1. Estudiar experimentalmente el comportamiento del frente de combustión en la mitad de una circunferencia, para después seguir hacia el diseño del círculo completo.
2. Determinar si el radio de curvatura del codo, o la relación entre este y el radio del tubo, influye sobre los fenómenos estudiados.
3. Realizar experimentos similares con un medio poroso distinto, como espumas cerámicas, y contrastar los resultados.
4. Estudiar el proceso de combustión en una curva completo, con ecuaciones de conservación de energía y especie química, mediante un modelo computacional, que permita entender en detalle lo que ocurre al interior del reactor, y buscar parámetros óptimos de funcionamiento para este.

Se espera que este trabajo permita abrir nuevas líneas de investigación, con ideas novedosas. El desarrollo de la combustión en medio poroso inerte no tiene por qué centrarse únicamente

en el medio poroso, combustibles o parámetros óptimos; es posible también innovar desde la geometría del reactor. Este trabajo busca ser un aporte al desarrollo de nuevas tecnologías, a la mejora de los procesos de combustión y producción de energía, para avanzar hacia un futuro en que, como humanidad, logremos frenar y revertir todo el daño que hemos producido a este planeta, para seguir viviendo en él, junto a todas las otras formas de vida que nos acompañan.

Bibliografía

- [1] Abdul Mujeebu M, Abdullah M Z, Abu Bakar M Z, Mohamad A A, Muhad R M N, Abdullah M K (2009). Combustion in porous media and its applications – A comprehensive survey. *Journal of Environmental Management*, 90 (8), 2287-2312. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.10.009>
- [2] Al-Hamambre Z, Al-Zoubi A (2010). The use of inert porous media based reactors for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (5), 1971-1986. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.079>
- [3] Al-Hamambre Z, Diezinger S, Talukdar P, Von Issendorf F, Trimis D (2006). Combustion of Low Calorific Gases from Landfills and Waste Pyrolysis Using Porous Medium Burner Technology. *Process Safety and Environmental Protection*, 84 (4), 297-308. <https://doi.org/10.1205/psep.05167>
- [4] Babkin V S, Korzhavin A A, Bunev V A (1991). Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media. *Combustion and Flame*, 87 (2), 182-190. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(91\)90168-B](https://doi.org/10.1016/0010-2180(91)90168-B)
- [5] Barcellos W M, Souza L C, Saveliev A V, Kennedy L A (2011). Ultra-low-emission steam boiler constituted of reciprocal flow porous burner. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35 (3), 570-580. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.11.005>
- [6] Bingue J P, Saveliev A V, Fridman A A, Kennedy L A (2002). Hydrogen production in ultra-rich filtration combustion of methane and hydrogen sulfide. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27 (6), 643-649. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00174-4](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00174-4)

- [7] Bowman C (1992). Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: Technology driven by regulation. *Symposium (International) on Combustion*, 24 (1), 859-878. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(06\)80104-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(06)80104-9)
- [8] Bubnovich V, Hernández H, Toledo M, Flores C (2021). Experimental investigation of flame stability in the premixed propane-air combustion in two-section porous media burner. *Fuel*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120117>
- [9] Cengel Y, Boles M (2006). *Termodinámica* (5ta ed.). McGraw-Hill.
- [10] Chih-Yung Wu, Kun-Ho Chen, Shou Yin Yang (2014). Experimental study of porous metal burners for domestic stove applications. *Energy Conversion and Management*, 77, 380-388. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.002>
- [11] Dean W R (1927). XVI. Note on the motion of fluid in a curved pipe. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 4(20), 208–223. <https://doi.org/10.1080/14786440708564324>
- [12] de Klerk, A (2003). Voidage Variation in Packed Beds at Small Column to Particle Diameter Ratio. *AIChE Journal*, 49 (8). <https://doi.org/10.1002/aic.690490812>
- [13] Delalic N, Mulahasanovic Dz, Ganic E N (2004). Porous media compact heat exchanger unit—experiment and analysis. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28 (2, 3), 185-192. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(03\)00038-4](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(03)00038-4)
- [14] Dillon J (1999). Combustion in porous media. <https://doi.org/10.2172/765956>
- [15] Ergun S, Orning A A (1949). Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds. *Industrial & Engineering Chemistry*, 41 (6), 1179-1184. <https://doi.org/10.1021/ie50474a011>
- [16] Fenimore C P (1971). Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. *Symposium (International) on Combustion*, 13 (1), 373-380. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80040-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80040-1)
- [17] Gharehghani A, Ghasemi K, Siavashi M, Mehranfar S (2021). Applications of porous materials in combustion systems: A comprehensive and state-of-the-art review. *Fuel*, 304, 121411. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121411>

- [18] GoGaS Goch GmbH & Co. KG. (2023, 6 de diciembre). Example application of porous radiation burners: steel coil dyers [Fotografía]. En KIT Research to Business. Recuperado el 25 de septiembre de 2025, de <https://www.kit-technology.de/en/blog/burning-for-the-future-of-hydrogen>
- [19] Guo Z, Sun Z, Zhang N, Cao X, Ding M (2019). Mean porosity variations in packed bed of monosized spheres with small tube-to-particle diameter ratios. *Powder Technology*, 354, 842-853. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.001>
- [20] Hanamura K, Echigo R, Zhandok S (1993). Superadiabatic combustion in a porous medium. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36 (13), 3201-3209. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(93\)90004-P](https://doi.org/10.1016/0017-9310(93)90004-P)
- [21] Henríquez-Vargas L, Valeria M, Bubnovich V (2015). Numerical study of lean combustibility limits extension in a reciprocal flow porous media burner for ethanol/air mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 1155-1163. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.115>
- [22] Hoekman S K, Robbins C (2012). Review of the effects of biodiesel on NOx emissions. *Fuel Processing Technology*, 96, 237-249. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.12.036>
- [23] Hoffmann J G,, Echigo R, Yoshida H, Tada S (1997). Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system. *Combustion and Flame*, 111, 32-46. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(97\)00099-0](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(97)00099-0)
- [24] Hsu P-F, Evans W D, Howell J R (1993). Experimental and Numerical Study of Premixed Combustion Within Nonhomogeneous Porous Ceramics. *Combustion Science and Technology*, 90 (1-4), 149-172. <https://doi.org/10.1080/00102209308907608>
- [25] Huang X Y, Liu C Y (1996). The developing flow in a channel filled with porous media. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 23 (1), 123-132. [https://doi.org/10.1016/0735-1933\(95\)00090-9](https://doi.org/10.1016/0735-1933(95)00090-9)
- [26] Kim J, Yadav M, Kim S (2014). Characteristics of Secondary Flow Induced by 90-Degree Elbow in Turbulent Pipe Flow. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(2), 229-239. <https://doi.org/10.1080/19942060.2014.11015509>

- [27] Kobayashi H, Hayakawa A, Somarathne K D, Okafor E C (2019). Science and technology of ammonia combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(1), 109-133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>
- [28] Konnov A A, Mohammad A, Kishore V R, Kim N I, Prathap C, Kumar S (2018). A comprehensive review of measurements and data analysis of laminar burning velocities for various fuel+air mixtures. *Progress in Energy and Combustion Science*, 68, 197-267. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.05.003>
- [29] Kotani Y, Behbahani H F, Takeno T (1985). An excess enthalpy flame combustor for extended flow ranges. *Symposium (International) on Combustion*, 20 (1), 2025-2033. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(85\)80703-7](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(85)80703-7)
- [30] Lewis B, von Elbe G (2012). *Combustion, flames and explosions of gases* (3rd edition). Academic Press Inc. Tabla 1 en el apéndice C, p. 706.
- [31] Liu Y, Deng Y, Shi J, Liu Y, Wang X, Ge B, Min Z (2023). Experimental investigation on flame stability and emissions of lean premixed methane–air combustion in a developed divergent porous burner. *Journal of Cleaner Production*, 405, 137070. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137070>
- [32] Lyamin G A, Pinaev A V (1986). Combustion Regimes for gases in an inert porous material. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 22, 553-558. <https://doi.org/10.1007/BF00755524>
- [33] Mößbauer S, Durst F, Trimis D, Haas T (2001). Zero Emission Engine — A Novel Steam Engine for Automotive Applications. *The Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2001)*,
- [34] Muñoz Herrera C, Skurtys O, Nikrityuk P, Hayes R E, Toledo M (2024). Stabilization of methane–hydrogen flames inside a divergent porous media reactor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 40 (1-4), 105719. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105719>
- [35] Pandey J K, Dinesh M H, Kumar G N (2023). A comparative study of NO_x mitigating techniques EGR and spark delay on combustion and NO_x emission of ammonia/hydrogen and hydrogen fuelled SI engine. *Energy*, 276, 127611. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127611>

- [36] Pantangi V K, Mishra S C (2006). Combustion of gaseous hydrocarbon fuels within porous media—a review. *Advances in Energy Research*, 8, 455-461.
- [37] Ribeiro A M, Neto P, Pinho C (2010). Mean porosity and pressure drop measurements in packed beds of monosized spheres: side wall effects. *International Review of Chemical Engineering*, 2(1), 40-46.
- [38] Seguel F A (2012). *Diseño computacional de un quemador anular de medio poroso inerte* [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Tecnológica Metropolitana.
- [39] Shaddix C, Molina A (2011). Ignition, flame stability, and char combustion in oxy-fuel combustion. En Zheng L (Ed.), *Oxy-Fuel Combustion for Power Generation and Carbon Dioxide (CO₂) Capture*, (pp. 101-124). Woodhead Publishing.
- [40] Sudo K, Sumida M, Hibara H (1998). Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend. *Experiments in Fluids*, 25, 42-49. <https://doi.org/10.1007/s003480050206>
- [41] Taibi R, Yin G, Ong M C (2021). CFD investigation of internal elbow pipe flows in laminar regime. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*. 10.1088/1757-899X/1201/1/012012
- [42] Trimis D, Durst F (1996). Combustion in a porous medium—advances and applications. *Combustion Science and Technology*, 121 (1-6), 153-168. <https://doi.org/10.1080/00102209608935592>
- [43] Wood S, Harris A T (2008). Porous burners for lean-burn applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 (5), 667-684. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.04.003>
- [44] Yan Y, Zhang C, Wu G, Feng S, Yang Z (2022). Numerical study on methane/air combustion characteristics in a heat-recirculating micro combustor embedded with porous media. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (48), 20999-21012. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.201>
- [45] Zheng C, Cheng L, Cen K, Bingue J P, Saveliev A (2012). Partial oxidation of methane in a reciprocal flow porous burner with an external heat source. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (5), 4119-4126. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.142>

Anexos

Perfiles de temperatura experimentales

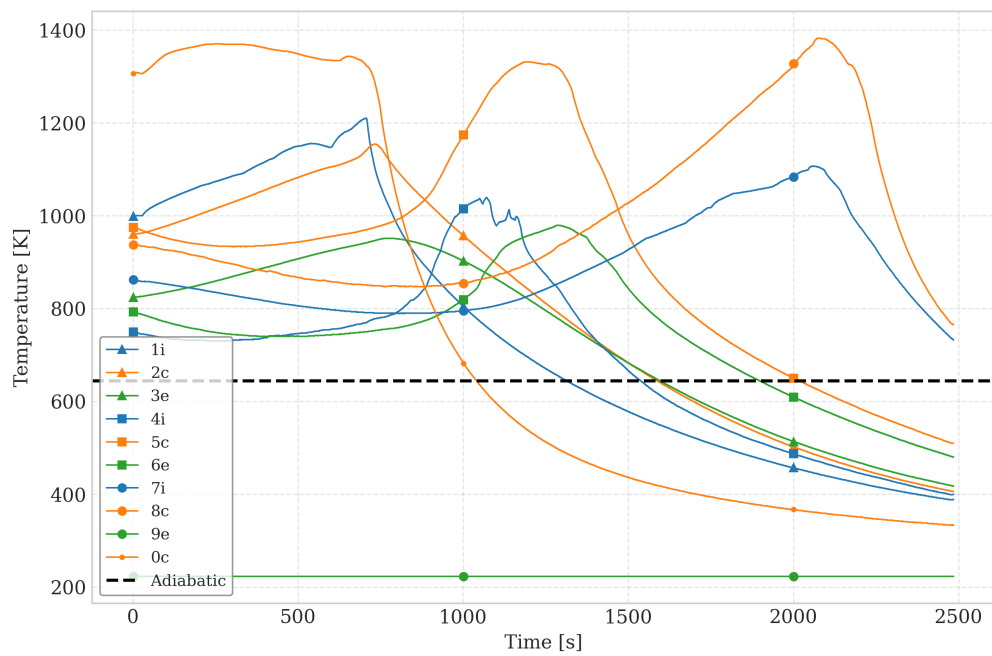


Figura 7.1: Temperaturas para $u = 0.8$ [m/s] y $\phi = 0.20$.

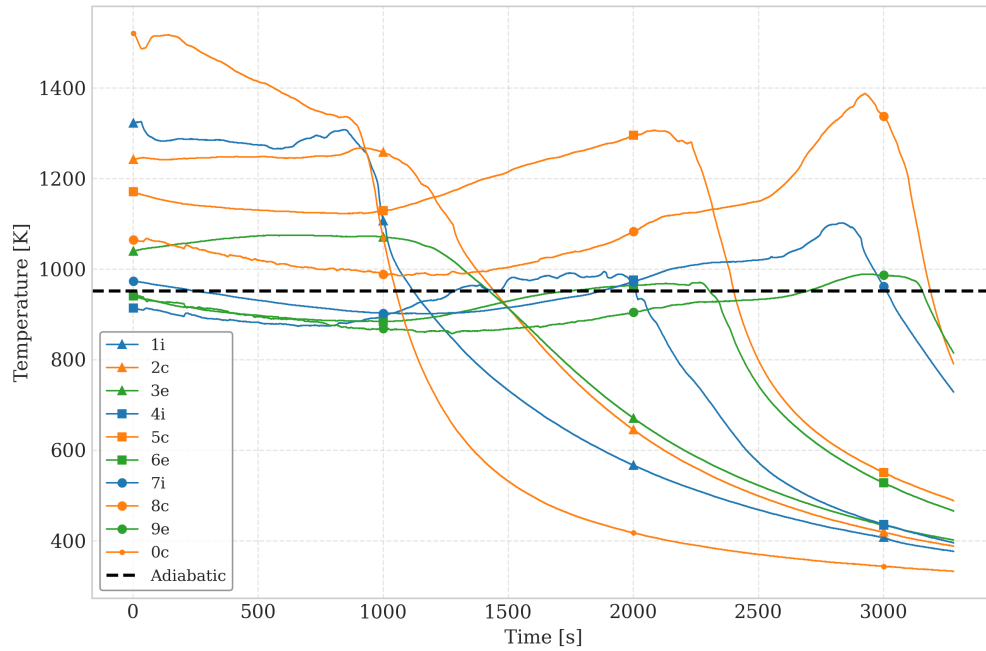


Figura 7.2: Temperaturas para $u = 0.8 [m/s]$ y $\phi = 0.25$.

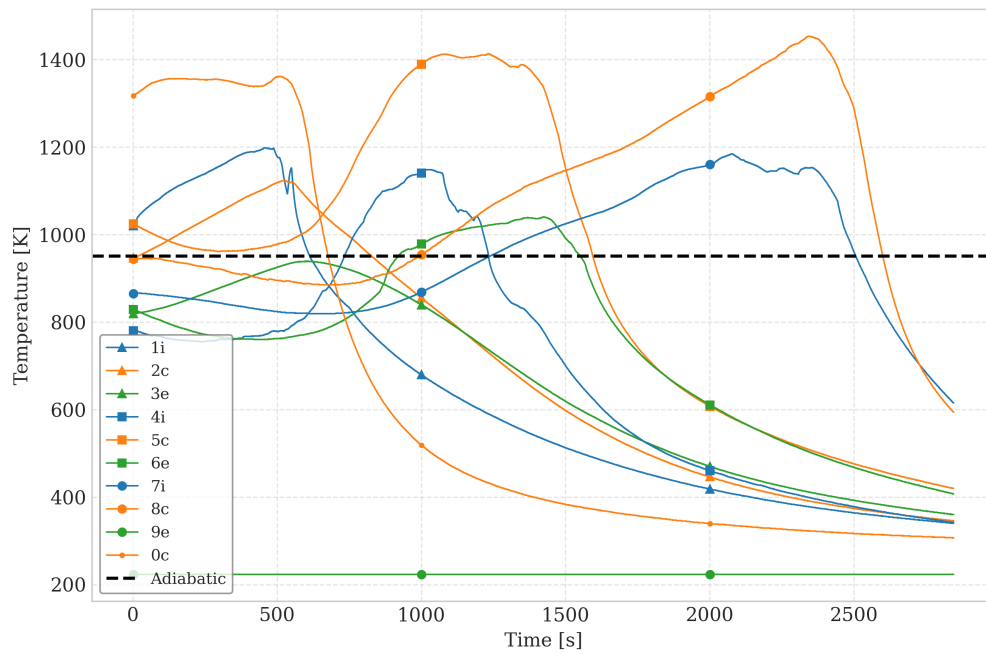


Figura 7.3: Temperaturas para $u = 1.0 [m/s]$ y $\phi = 0.25$.

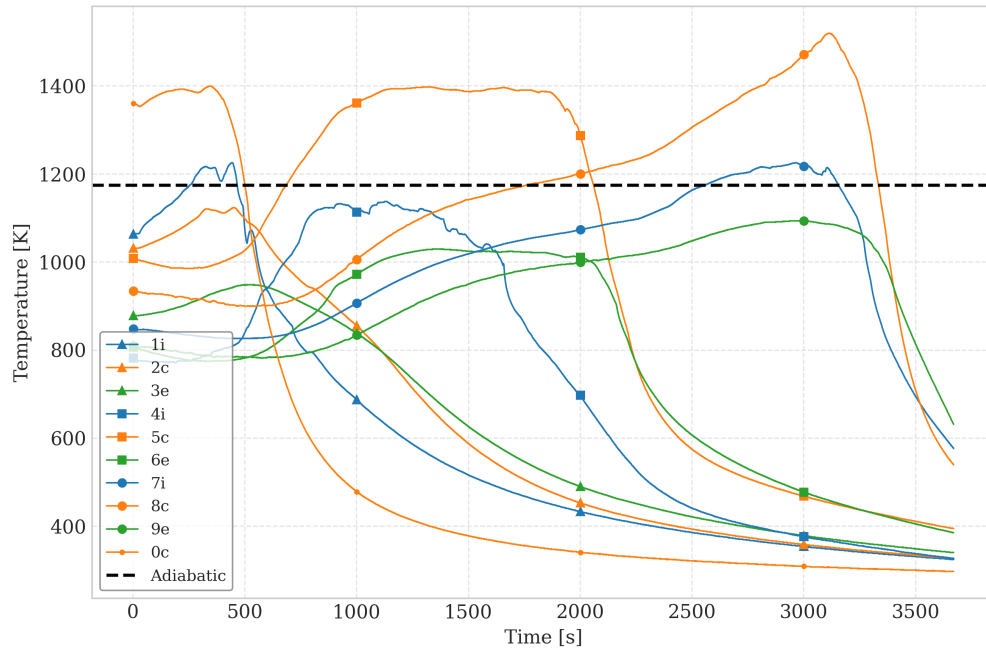


Figura 7.4: Temperaturas para $u = 1.0$ [m/s] y $\phi = 0.35$.

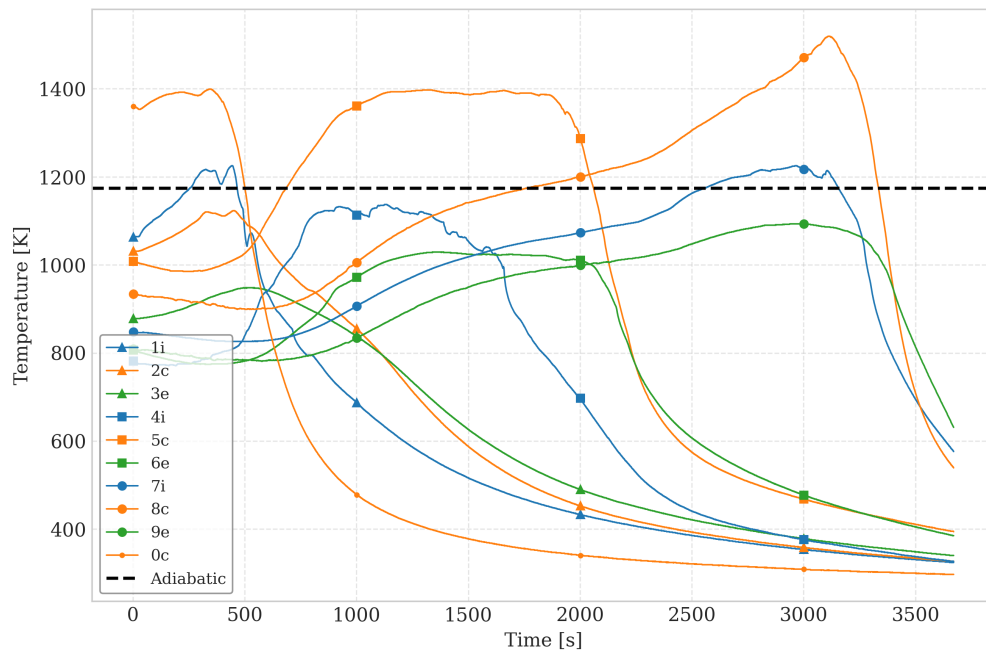


Figura 7.5: Temperaturas para $u = 1.5$ [m/s] y $\phi = 0.35$.