



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Estudio de un modelo de transferencia de calor en el  
cilindro de motores operando con hidrógeno y gas natural.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR/A: Lechiguero Pardo, Irene

Tutor/a: Martín Díaz, Jaime

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

*A mi familia,  
amigos  
y los que me ayudaron*



# Resumen

El presente proyecto de fin de carrera se va a focalizar en el estudio y comprobación de la bondad de un modelo de transferencia de calor existente (propuesto por G. Woschni) aplicado a motores alternativos operando con hidrógeno y gas natural. El análisis de resultados permitirá identificar las limitaciones del modelo existente, y se propondrán propuestas alternativas. Para el desarrollo del proyecto se utilizarán datos obtenidos en simulaciones CFD, como aproximación a la realidad, y el cálculo de propiedades termo-físicas para la evaluación de su efecto en la transferencia de calor.

Irene Lechiguero Pardo  
ilechigueropardo@gmail.com

**Palabras Clave:** hidrógeno, gas natural, motor alternativo, coeficiente de película y transferencia de calor

# Resum

El present projecte de fi de carrera es focalitzarà en l'estudi i comprovació de la bondat d'un model de transferència de calor existent (proposat per G. Woschni) aplicat a motors alternatius operant amb hidrogen i gas natural. L'anàlisi de resultats permetrà identificar les limitacions del model existent, i es proposaran propostes alternatives. Per al desenvolupament del projecte s'utilitzaran dades obtingudes en simulacions CFD, com aproximació a la realitat, i el càlcul de propietats termo-físiques per a l'avaluació del seu efecte en la transferència de calor.

Irene Lechiguero Pardo  
ilechigueropardo@gmail.com

**Paraules clau: hidrogen, gas natural, motor alternatiu, coeficient de pel·lícula i transferència de calor**

# Abstract

This degree's final year project will focus on the study and verification of the goodness of an existing heat transfer model (proposed by G. Woschni) applied to reciprocating engines operating with hydrogen and natural gas. The analysis of results will allow identifying the limitations of the existing model, and alternative proposals will be presented. For this project's development, data obtained from CFD simulations will be used as an approximation to reality and the calculation of thermo-physical properties will be performed to evaluate their effect on the heat transfer.

Irene Lechiguero Pardo  
ilechigueropardo@gmail.com

**Keywords:** hydrogen, natural gas, reciprocating engine, convective heat transfer coefficient and heat transfer



# Abreviaturas

## Latinos

$A$	Área
$a$	Velocidad media del sonido
$c_1$	Constante de ajuste en la función $f_w$
$c_m$	Velocidad lineal media del pistón
$c_p$	Calor específico a presión constante
$\bar{c}_u$	Velocidad media tangencial generada por el movimiento de swirl
$c_v$	Calor específico a volumen constante
$C_{w1}$	Constante de ajuste del término referente a la velocidad del pistón en la ecuación de obtención de la velocidad del gas
$C_{w2}$	Constante de ajuste del término referente al movimiento de tumble en la ecuación de obtención de la velocidad del gas
$D$	Diámetro del cilindro
$e$	Espesor de la lámina de fluido
$f_w$	Función en forma de S con valores entre 0 y 1
$h$	Coefficiente de película. Coeficiente de convección
$k_g$	Conductividad térmica
$L$	Longitud característica
$m$	Constante de ajuste en la función $f_w$
$n$	Revoluciones por segundo
$N_T$	Frecuencia del vórtice de swirl
$Nu$	Número de Nusselt
$P$	Presión
$P_m$	Presión de un ensayo en arrastre análoga a la de un ensayo de combustión (presión en el mismo ángulo de cigüeñal)
$Pr$	Número de Prandtl
$\dot{Q}$	Transferencia de calor
$R$	Constante de los gases ideales
$Re$	Número de Reynolds
$r_w$	Cociente entre las constantes $C_{w1}$ y $C_{w2}$ de la ecuación de Woschni
$T$	Temperatura

$V_d$	Volumen desplazado
$v_g$	Velocidad del gas
$v_m$	Velocidad media característica del gas
$X_i$	Fracción molar de la especie i
$Y_i$	Fracción másica de la especie i

## Griegos

$\alpha$	Difusividad térmica. Ángulo
$\alpha_0$	Ángulo de cigüeñal inicial
$\alpha_f$	Ángulo de cigüeñal final
$\gamma$	Coefficiente de dilatación adiabática
$\lambda_{mpf}$	Ruta media de los fonones
$\mu$	Viscosidad dinámica
$\nu$	Difusividad viscosa
$\rho$	Densidad

## Siglas

$0 - D$	Cero Dimensiones
$CFD$	Análisis fluidodinámico computacional (Computational Fluid Dynamics)
$CTM$	Coefficiente de Torbellino Medio
$ECU$	Unidad de control electrónico (Electronic Control Unit)
$EGR$	Sistema de recirculación de gases de escape
$MCIA$	Motor de combustión Interna Alternativo
$MEC$	Motor de Encendido por Compresión
$MEP$	Motor de Encendido Provocado
$PM$	Peso Molecular
$SI$	Sistema Internacional

## Subíndices

$0$	Punto inicial
$f$	Punto final
$i$	Especie i
$IVC$	Condiciones al cierre de las válvulas de admisión
$g$	Gas
$m$	Condiciones de un ensayo en arrastre análogo a un ensayo de combustión (en el mismo ángulo de cigüeñal)



# Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abreviaturas	IX
Índice general	X
Índice de figuras	XIV
Índice de tablas	XVI
I Memoria	1
1 Introducción	3
1.1 Problemática de los combustibles fósiles . . . . .	3
1.2 Combustibles no convencionales: desarrollo y proyección . . . . .	5
1.3 Justificación de la necesidad de modelos de transferencia de calor en la cámara de un MCIA . .	6
1.4 Objetivos . . . . .	8
2 Metodología, ensayos a realizar y herramientas utilizadas	9
2.1 Metodología . . . . .	9
2.2 Ensayos a realizar . . . . .	10
2.3 Herramientas utilizadas. . . . .	15
3 Marco teórico	18
3.1 Propiedades termo-físicas . . . . .	18
3.2 Modelo de Woschni de transferencia de calor en MCIA. . . . .	22
3.3 Desarrollo de la Propuesta 1 . . . . .	23
3.4 Desarrollo de la Propuesta 2 . . . . .	25

3.5 Cálculo del coeficiente de convección mediante CFD . . . . .	26
3.6 Desarrollo de la correlación de velocidad . . . . .	26
4 Estudio de la transferencia de calor en arrastre sin Tumble . . . . .	30
4.1 Efecto del cambio de combustible a misma presión, temperatura y velocidad del gas . . . . .	30
4.2 Efecto combinado de las especies y distintas condiciones de presión y temperatura . . . . .	34
4.3 Efecto de la utilización de la velocidad local del gas proporcionada por CFD . . . . .	37
4.4 Efecto de la utilización de la velocidad lineal media del pistón como velocidad del gas . . . . .	39
5 Estudio de la transferencia de calor en arrastre con Tumble . . . . .	42
5.1 Efecto de la utilización de la ecuación de la velocidad con movimiento de tumble . . . . .	42
5.2 Efecto del uso de una mezcla pobre . . . . .	47
6 Conclusiones . . . . .	55
6.1 Deducciones sobre la idoneidad de los modelos descritos . . . . .	55
6.2 Conclusiones específicas . . . . .	56
6.3 Aplicabilidad e impacto del proyecto . . . . .	57
Bibliografía . . . . .	59
II Presupuesto . . . . .	62
7 Introducción . . . . .	64
8 Cuadros de precios . . . . .	65
8.1 Cuadro de Precios de Mano de Obra . . . . .	65
8.2 Cuadro de Precios de Maquinaria . . . . .	66
9 Presupuesto . . . . .	67
9.1 Presupuesto de Ejecución Material (PEM) . . . . .	67
9.2 Presupuesto de Ejecución por Contrata . . . . .	68
9.3 Presupuesto Base de Licitación . . . . .	69
III Anexo de cálculo . . . . .	71
10 Descripción del caso 3 . . . . .	73
10.1 Características del caso . . . . .	73
10.2 Comparación del coeficiente de película . . . . .	74
10.3 Efecto de distintas condiciones de presión y temperatura . . . . .	75
11 Descripción del caso 5 . . . . .	76
11.1 Características del caso . . . . .	76
11.2 Comparación de las propiedades termo-físicas . . . . .	77

11.3 Comparación del coeficiente de película . . . . .	78
11.4 Efecto de distintas condiciones de presión y temperatura. . . . .	79

# Índice de figuras

1.1. Consumo de energía final por sectores en el año 2019 . . . . .	3
2.1. Esquema de la metodología seguida durante el proyecto . . . . .	9
2.2. Tipología de movimiento del gas en el cilindro de un MCIA . . . . .	11
3.1. Ajuste de la función $f_w$ a los datos experimentales . . . . .	28
4.1. Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 1 . . . . .	30
4.2. Propiedades termo-físicas para el hidrógeno y el gas natural en el caso 1 . . . . .	31
4.3. Coeficiente de película local para el hidrógeno y el gas natural en el caso 1 . . . . .	33
4.4. Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 2 . . . . .	35
4.5. Coeficiente de película local para el hidrógeno en los casos 1 y 2 . . . . .	36
4.6. Coeficiente de película local para el hidrógeno y el gas natural en el caso 2 . . . . .	38
4.7. Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 4 . . . . .	39
4.8. Coeficiente de película medio para el hidrógeno y el gas natural en el caso 4 . . . . .	40
5.1. Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 6 . . . . .	42
5.2. Coeficiente de película medio para el hidrógeno y el gas natural en el caso 6 . . . . .	43
5.3. Incremento que supone el cambio de combustible en el caso 6 . . . . .	44
5.4. Números adimensionales del gas natural para el caso 6 . . . . .	45
5.5. Números adimensionales del hidrógeno para el caso 6 . . . . .	46
5.6. Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 7 . . . . .	47
5.7. Coeficiente de película medio para los casos 6 y 7 del ensayo con hidrógeno . . . . .	48
5.8. Propiedades termo-físicas para los casos 6 y 7 de hidrógeno . . . . .	50
5.9. Decremento del coeficiente de película medio entre los casos 6 y 7 de gas natural . . . . .	51
5.10. Propiedades termo-físicas para los casos 6 y 7 de gas natural . . . . .	52

5.11. Coeficiente de película medio para el hidrógeno y el gas natural en el caso 7 . . .	53
5.12. Incremento que supone el cambio de combustible en el caso 7 . . . . .	53
10.1. Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 3 . . . . .	73
10.2. Coeficiente de película medio para el hidrógeno y el gas natural en el ensayo 3 .	74
11.1. Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 5 . . . . .	76
11.2. Propiedades termo-físicas para el hidrógeno y el gas natural en el caso 5 . . . .	77
11.3. Coeficiente de película medio para el hidrógeno y el gas natural en el caso 5 . .	78

# Índice de tablas

2.1. Ensayos sin movimiento de tumble . . . . .	14
2.2. Ensayos con movimiento de tumble . . . . .	15
2.3. Acrónimos utilizados en las leyendas . . . . .	15
3.1. Iteraciones en el ajuste de la función $f_w$ . . . . .	28
3.2. Constantes ajustadas en la ecuación de velocidad . . . . .	29
4.1. Incremento de la densidad por el cambio de combustible . . . . .	32
4.2. $c_p$ para el caso del hidrógeno . . . . .	32
4.3. $c_p$ para el caso del gas natural . . . . .	33
4.4. Incremento promedio del coeficiente de película en los casos 1 y 2 . . . . .	36
4.5. Diferencias entre el coeficiente de película para el hidrógeno de los casos 1 y 2 .	37
4.6. Diferencias entre la densidad para el hidrógeno en los casos 1 y 2 . . . . .	37
4.7. Incremento del pico del coeficiente de película en el caso 4 . . . . .	40
4.8. Incremento promedio del coeficiente de película en el caso 4 . . . . .	41
5.1. Decremento del pico del coeficiente de película entre los casos 6 y 7 de hidrógeno	49
5.2. Diferencias entre el coeficiente de película de los casos 6 y 7 para el hidrógeno .	49
5.3. Decremento del pico del coeficiente de película entre los casos 6 y 7 de gas natural . . . . .	50
5.4. Diferencias entre el coeficiente de película de los casos 6 y 7 para el gas natural	51
7.1. Siglas referentes a los recursos del presupuesto . . . . .	64
10.1. Incrementos promedio del coeficiente de película en los casos 1 y 3 . . . . .	74
10.2. Diferencias entre el coeficiente de película de los casos 3 y 4 . . . . .	75

11.1. Incremento de las propiedades termo-físicas para los casos 1, 3 y 5 . . . . .	77
11.2. Incrementos promedio del coeficiente de película en el caso 5 . . . . .	78
11.3. Diferencias entre el coeficiente de película de los ensayos 5 y 6 . . . . .	79



Parte I

Memoria

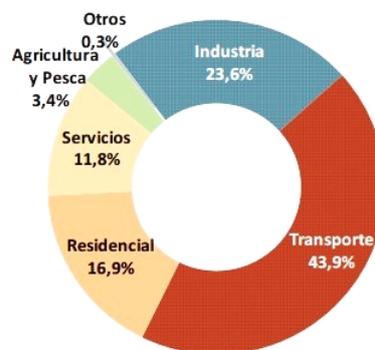


## Introducción

### 1.1 Problemática de los combustibles fósiles

Los combustibles fósiles son fuentes de energía procedentes de la descomposición de materia orgánica de animales, plantas y microorganismos, proceso de transformación que conlleva millones de años. Entre ellos se pueden distinguir tres grupos principales: el petróleo, el carbón y el gas natural.

Hoy en día, la mayor parte de la energía utilizada mundialmente proviene de estas fuentes no renovables, lo que resulta en unas emisiones nocivas a la atmósfera crecientes año a año y un gasto de combustible no recuperable a corto plazo. En concreto, el sector del transporte supone alrededor del 40 % de la energía total consumida a nivel nacional, manteniendo un crecimiento constante y superior al de cualquier otro sector económico [1].



**Figura 1.1:** Consumo de energía final por sectores en el año 2019

Este tipo de carburantes, al ser sometidos a un proceso de combustión, emiten una serie de sustancias nocivas para el medio ambiente, siendo las más abundantes y preocupantes, los óxidos de nitrógeno y de carbono.

Como se puede observar en la ecuación (1.1), el  $CO_2$  es un producto inevitable en una combustión generada con un carburante, lo que supone que para reducir las emisiones de este gas, se deberá quemar menos combustible para la misma potencia demandada. Hay distintos enfoques para abordar este problema, entre los cuales está incrementar el rendimiento efectivo del motor, la hibridación, la recuperación energética de los gases de escape o el uso de biocombustibles (los cuales no siempre conllevan una reducción en la producción de  $CO_2$  pero forman parte del ciclo natural del carbono<sup>1</sup>).



En el caso de poder llevar a cabo una reacción de combustión perfecta, los únicos productos generados serían el agua en forma de vapor, los dióxidos de carbono y las moléculas de nitrógeno, pero por desgracia, las reacciones perfectas solo existen en la teoría. En el cilindro de un motor intervienen gran cantidad de procesos en un tiempo limitado, por lo que el control de todas las variables es prácticamente imposible. Además, el combustible que se introduce en los vehículos contiene aditivos (que mejoran las características del mismo), antidetonantes, azufres, etc. Por ello, como resultado de la reacción de combustión en el pistón se producen, además de los productos ya nombrados, óxidos de nitrógeno, hollín e hidrocarburos entre otros.

Los óxidos de nitrógeno se forman debido a las altas temperaturas y presiones generadas en la cámara de combustión. Según la unión formada entre las moléculas de oxígeno y nitrógeno se puede formar un compuesto u otro. Los combustibles generan primordialmente  $NO$ , los cuales se oxidan convirtiéndose en  $NO_2$  y  $NO_3$ , pudiendo posteriormente reaccionar creando otros contaminantes como el ozono. Para reducir estas emisiones, se han desarrollado sistemas activos y pasivos<sup>2</sup>, como la reducción catalítica selectiva o el sistema de recirculación de gases de escape (EGR).

Debido a la producción de estos gases nocivos por parte de los combustibles fósiles, diversos problemas de salud ambiental están ganando importancia, alarmando tanto a la comunidad científica como a ciudadanos y políticos. Desde hace años se llevan tomando medidas para mejorar la situación, consiguiendo avances significativos en lo referente a la tecnología, pero no siendo estos suficientes. Por ejemplo, el sector de la automoción se ha visto sometido a regulaciones cada vez más restrictivas en cuanto a los límites de emisiones de los vehículos, suponiendo la introducción de diferentes sistemas de postratamiento (como el catalizador de tres vías en los motores de encendido provocado, MEP, o el filtro de partículas y las trampas de  $NO_x$  en los motores de encendido por compresión, MEC) o mejoras de los sistemas ya utilizados (como un mayor control mediante la sonda lambda<sup>3</sup> de la cantidad de aire y combustible que componen la mezcla en cada momento). Aun así, como el uso de este tipo de energía está tan extendido, las emisiones siguen al alza y la posible solución del problema implica mayores restricciones y nuevas invenciones.

---

<sup>1</sup>Los biocombustibles se producen a partir de materiales generados por seres vivos, materiales que contienen carbono de por sí. Por lo tanto, cuando se transforma el  $C_xH_y$  en  $CO_2$  durante la combustión, el carbono originado pertenece al ya existente en la tierra, no creándose mayor cantidad.

<sup>2</sup>Los sistemas activos evitan la formación de sustancias contaminantes, mientras que los sistemas pasivos se encargan de eliminar los gases nocivos ya creados.

<sup>3</sup>La sonda lambda es un dispositivo que se introduce en el tubo de escape justo antes del catalizador. Se ocupa de medir la cantidad de oxígeno que contienen los gases de escape, información que la unidad de control electrónico (ECU) utilizará para comprobar si el dosado relativo introducido en el pistón es el correcto.

Tanta es la preocupación por la contaminación del sector del transporte que la Comisión Europea ha propuesto para el 2035 el fin de la venta de coches que emitan dióxido de carbono, es decir, cualquier vehículo que trabaje con motores de gasolina, diésel, gas o híbridos [2]. Desde Bruselas se lanzó un comunicado en julio de 2021 sobre la necesidad de un plan de lucha contra el cambio climático para cualquier empresa que quiera involucrarse en el mercado europeo. Y aunque importante, esta no es la única medida que Europa va a tomar en cuanto a esta problemática, si no que ha puesto también como objetivo conseguir la neutralidad climática para 2050, habiendo definido ya algunas medidas recogidas en el plan *Fit for 55*. Este plan incluye, entre otros, el propósito de duplicar las energías renovables hasta alcanzar el 40 % de cuota en 2030, la definición de objetivos obligatorios de eficiencia energética y el endurecimiento de las condiciones de emisión de  $CO_2$ , aumentando el precio de la tonelada emitida.

Aunque no se conoce hoy en día una alternativa clara al uso de los combustibles fósiles, la necesidad de reinventar el sector para no depender de ellos es clara. Por ello, es tan importante la labor de investigación que se está llevando a cabo en diferentes campos relacionados con los combustibles no convencionales, resultando en posibles soluciones como el uso de pilas de hidrógeno o motores de combustión que funcionen con ello, la oxicomustión o el mayor desarrollo de los motores eléctricos.

## 1.2 Combustibles no convencionales: desarrollo y proyección

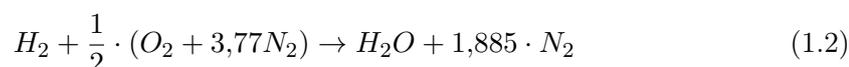
Se entiende por combustible alternativo o no convencional, cualquiera que sustituya al petróleo, gas natural, carbón o energía nuclear, siendo por consiguiente una fuente más limpia<sup>4</sup>. En este grupo se pueden definir infinidad de tipos dependiendo del sector en el que se quieran emplear, pero este documento se va a centrar en fuentes de energía que se puedan aplicar al vehículo.

- **Sistemas propulsivos eléctricos:** son los que sustituyen el MCI por baterías. Siendo esta opción una de las más impulsadas por los gobiernos de la Unión Europea, supone una menor emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera durante la utilización del vehículo. Esta diferencia en emisiones dependerá de las fuentes de energía que se utilicen para producir la electricidad empleada durante el trayecto y del tipo de vehículo que sea, ya que existen diversos tipos de coches eléctricos. Además, a diferencia de los bajos rendimientos que presentan los MCI (30-45 %), los motores eléctricos cuentan con unas eficiencias mucho más altas (90-95 %). Esta solución, pese a tener innumerables ventajas, también tiene inconvenientes, como la producción y reciclaje de baterías, que sigue siendo un hándicap en cuanto a la no producción de residuos tóxicos.

---

<sup>4</sup>Una fuente que genere menos residuos contaminantes. Una fuente de energía limpia es aquella que en su producción excluye cualquier tipo de contaminación, principalmente la emisión de gases de efecto invernadero.

- **Pilas de hidrógeno:** propulsan vehículos que, siendo eléctricos, en lugar de almacenar la energía en baterías, la generan mediante el procesamiento del hidrógeno a medida que es necesaria para el vehículo. Esta metodología de obtención de energía solamente produce vapor de agua como producto de la reacción, por lo que aun teniendo tubo de escape, este no emite ninguna sustancia nociva. Desafortunadamente, esta tecnología también presenta inconvenientes, entre los cuales los más importantes son la obtención del hidrógeno y su almacenamiento. A pesar de que el hidrógeno es el elemento químico más común en la naturaleza, no existe por sí mismo, es decir, siempre está ligado a otros elementos de los cuales se debe separar y ese proceso conlleva un gasto de energía enorme. Además, debido a sus propiedades de volatilidad, su almacenamiento es complicado.
- **Hidrógeno en motores de combustión:** estrategia que se basa en utilizar el hidrógeno como combustible en un MCIA. La diferencia principal reside en que los productos resultantes de la reacción de combustión del hidrógeno no son contaminantes.



Una ventaja significativa de esta solución es que supone simplemente una evolución de los motores ya extendidos y utilizados por el público, además de la posible utilización de los sistemas de distribución e inyección tradicionales con apenas modificaciones. Otros factores a examinar de este tipo de motores son que debido a la gran reactividad del hidrógeno se podrá trabajar en mezclas pobres<sup>5</sup> (por lo que el gasto de combustible será menor) pero el almacenamiento seguirá siendo un problema y, aunque la combustión del hidrógeno es completamente limpia, en un motor térmico siempre se producirán emisiones de  $NO_x$ .

- **Combustibles sintéticos o e-fuels:** combustibles líquidos producidos en laboratorio que no proceden de fuentes de energía fósiles. Emiten menos gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles, pero su producción es mucho más cara [3]. Para su fabricación se utiliza electricidad obtenida de plantas solares y eólicas, la cual se emplea para generar el hidrógeno por electrólisis y junto con la captura de  $CO_2$  de la atmósfera y varios procesos químicos, se genera el combustible final. Aunque no se presentan como una alternativa definitiva a los combustibles fósiles, se plantean como una solución intermedia entre la situación actual y una futura en la que se pueda trabajar con fuentes 100% limpias.

### 1.3 Justificación de la necesidad de modelos de transferencia de calor en la cámara de un MCIA

Cuantificar la transferencia de calor en un ciclo de un MCIA es un problema complejo debido a la gran variabilidad que presenta en el tiempo y en el espacio. Además, será de gran importancia su conocimiento, ya que afecta a las prestaciones, el rendimiento y las emisiones del motor.

---

<sup>5</sup>Mezcla que trabaja con excesos de aire mayores a la unidad, es decir, se introducen menores cantidades de combustible que de aire en la cámara de combustión tomando como referencia la reacción estequiométrica.

Según Payri y Desantes [4] se pueden definir tres modos diferentes de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, siendo los principales en un motor los de convección y radiación.

- **Conducción:** es la transferencia de energía que se da en sólidos opacos y fluidos en reposo debido a movimientos aleatorios moleculares desde las partículas más energéticas a las menos energéticas.
- **Convección:** es el intercambio de energía producido entre fluidos y sólidos que se asocia a los cambios de temperatura y movimiento del fluido. La convección puede ser libre (causada por la diferencia en la densidad del fluido) o forzada (causada por el movimiento que se le aplica al fluido por un sólido externo), siendo la mayoritaria en un MCIA la forzada. Este modo de transferencia de calor se ve modificado por la diferencia de temperaturas, el área que se esté estudiando y lo que se denomina el coeficiente de película (variable que se explicará en capítulos posteriores).
- **Radiación:** es la energía electromagnética emitida por la materia debido a la agitación de sus componentes microscópicos. En el caso de los MCIA, se va a emitir por dos fuentes principales: el gas y las partículas de hollín formadas durante la combustión.

Centrando la atención en las prestaciones y el rendimiento, interesa que la transferencia de calor del gas a las paredes sea la menor posible, ya que un incremento en su magnitud se traducirá en una reducción de la energía destinada a producir trabajo mecánico, además de que si los gases de escape conservan la energía suficiente, esta podrá ser aprovechada posteriormente gracias a sistemas como el turbocompresor<sup>6</sup>. Por otro lado, se quiere que la transferencia de calor sea la suficiente como para no provocar roturas o desgastes en los materiales utilizados en los diferentes componentes del motor y para que no se produzcan problemas de combustiones anómalas, deterioro de lubricante o insuficiencia de refrigeración.

Un modelo teórico de transferencia de calor fiable proporciona información sobre los flujos térmicos presentes en la cámara de combustión de un MCIA, lo que posteriormente se empleará en la resolución del balance de energía tanto de modelos de diagnóstico, como predictivos. Las dos ventajas principales que presentan estos modelos frente al CFD son su velocidad de cómputo y su eficiencia, permitiendo así entender los fenómenos termo-fluido dinámicos que se producen en el cilindro y facilitando el proceso de desarrollo y mejora del MCIA (derivando en una disminución de los costes).

Eso sí, siempre que se apliquen este tipo de modelos se debe comprobar la bondad de la información obtenida y considerar que habrá siempre un error de cálculo presente, ya que estas ecuaciones teóricas se basan en modelos 0-D simplificados. Además, dependen de características del proceso que es muy complicado medir con exactitud y muchas de ellas se basan en correlaciones ajustadas a ensayos realizados (los cuales pueden presentar un comportamiento diferente al ensayo que se esté analizando).

---

<sup>6</sup>El turbocompresor utiliza la energía de los gases de escape para mover una turbina, que hará funcionar un compresor, el cual se encargará de introducir aire fresco forzado por la admisión.

## 1.4 Objetivos

Basándonos en toda la información indicada anteriormente se puede apreciar la necesidad de desarrollo de modelos de transferencia de calor fiables, o ajuste de los ya desarrollados, que ayuden a los fabricantes de vehículos en la búsqueda de una fuente de energía que permita el desplazamiento de personas y objetos de una forma sostenible y viable económicamente.

Este documento parte de la utilización del modelo de Woschni en dos tipos de combustibles (hidrógeno y gas natural) para determinar su bondad a la hora de predecir la transferencia de calor en el cilindro de un MCI. Además, se modificará de dos formas diferentes, obteniendo dos propuestas distintas.

De esta forma se discernirá si el modelo ampliamente utilizado describe el comportamiento de la transferencia de calor a lo largo del ciclo lo suficientemente bien o si alguna de las propuestas descritas representa de forma más fiable el proceso.

# Metodología, ensayos a realizar y herramientas utilizadas

## 2.1 Metodología

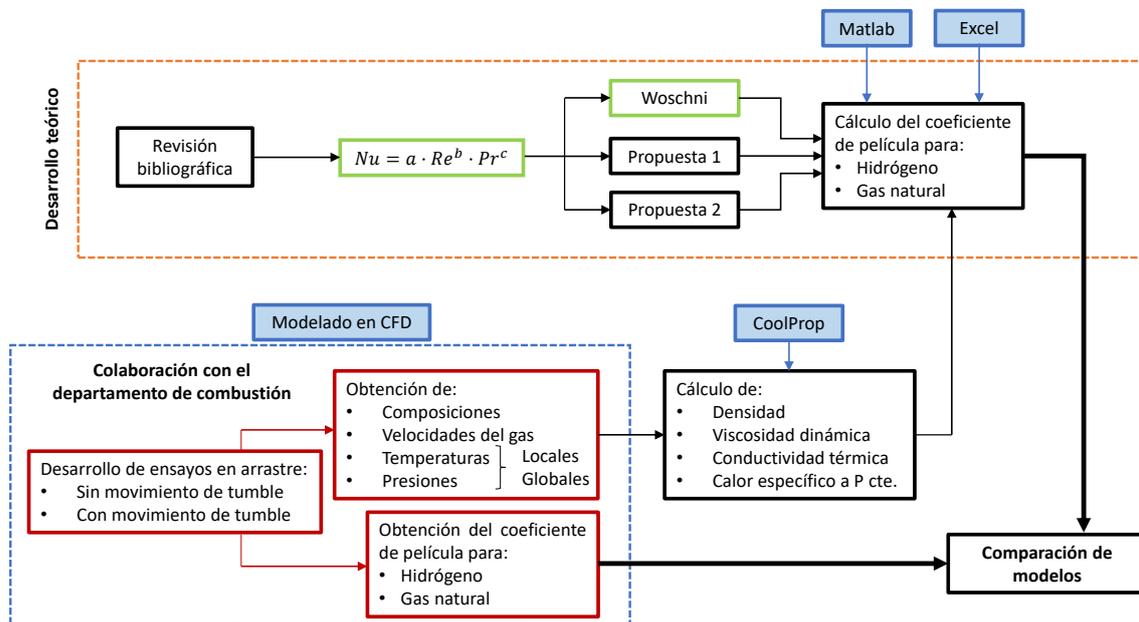


Figura 2.1: Esquema de la metodología seguida durante el proyecto

Mediante una primera revisión bibliográfica se obtiene la ecuación de Woschni [5]. Viendo que sus resultados con combustibles diferentes a la gasolina y el diésel no siguen las tendencias esperadas [6], se desarrollan dos propuestas que parten de la misma ecuación de la que partió Woschni en su momento.

Con el objetivo de comparar las propuestas entre sí y verificar su correcto funcionamiento en condiciones de operación con hidrógeno como combustible, se emplea la herramienta de análisis fluidodinámico computacional (CFD por sus siglas en inglés) como representación aproximada de la realidad. A partir de las simulaciones realizadas de un MEP en condiciones de arrastre, se obtienen datos de presiones, temperaturas y composiciones, los cuales se emplearán en el cálculo de las propiedades termo-físicas necesarias en las ecuaciones de predicción planteadas. Además, para corroborar que los cálculos realizados sean correctos, se extrae información sobre la densidad, conductividad térmica, viscosidad dinámica y calor específico.

Los ensayos y modelado del cilindro han sido generados por el departamento de combustión del Centro de Motores Térmicos (CMT), dada su especialización en esta rama de la investigación.

A lo largo de todo el proyecto se van a manejar cuatro herramientas principales: Excel y Matlab en los cálculos, CoolProp en el cómputo de las propiedades termo-físicas y CFD para la simulación del cilindro (como ya se había comentado).

## 2.2 Ensayos a realizar

### 2.2.1 *El ensayo de arrastre y las razones de su utilización*

Se entiende por ensayo de arrastre, un análisis del ciclo del motor en el que el suministro de combustible está interrumpido o el encendido deshabilitado, es decir, un test en el que no se produce combustión. Como particularidad, en el método de arrastre, la evolución de las propiedades termodinámicas del gas dependerá del proceso de compresión-expansión debido al movimiento del pistón.

Este tipo de ensayos se aplican comúnmente para determinar las pérdidas mecánicas que pueda tener un MCIA (ya sean globales o de cada elemento). En este trabajo, dada la corta disponibilidad de tiempo para analizar un problema complejo como es el estudio de la transferencia de calor, se emplea este tipo de ensayo para evitar el proceso de combustión que, aunque relevante, es complicado de abordar directamente.

Para que los resultados obtenidos sean acordes a las condiciones de funcionamiento habituales de un MCIA, se debe realizar el ensayo inmediatamente después de haber tenido el motor en funcionamiento y valiéndose de acondicionadores de temperatura para mantener el estado térmico del aceite y refrigerante. Como el presente proyecto es teórico, se realiza una primera simulación en condiciones de combustión, cuyos datos de salida se utilizarán como información de entrada en el ensayo de arrastre. De esta forma, las condiciones que presentará el test en cuanto a presión, temperatura y cargas se asemejarán más a las de un ciclo normal que si se realizara el ensayo directamente con el motor parado.

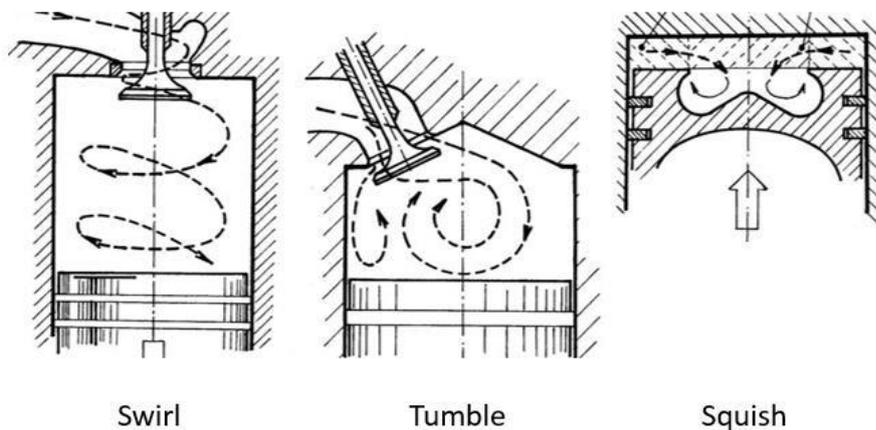
En este documento se describen dos tipos de ensayos de arrastre, uno en el que se ha modelado el ciclo cerrado partiendo del fluido en reposo y otro en el que se le ha introducido un movimiento inicial al gas para representar unas condiciones de funcionamiento más semejantes a las habituales.

### 2.2.2 *Movimiento de Tumble*

El movimiento del fluido en el interior del cilindro será un factor clave en diversos procesos del motor, como en la transferencia de calor, en la producción de emisiones y en la forma de la combustión. Generalmente, un mayor movimiento del fluido generará una mezcla más homogénea y por tanto, una mejor combustión.

Dentro del cilindro, el fluido presenta tres patrones de movimiento:

- **Swirl:** movimiento alrededor del eje del cilindro.
- **Tumble:** movimiento de rotación de la carga, originado en la admisión, con el eje perpendicular al eje del cilindro.
- **Squish:** movimiento debido a la geometría del pistón, el cual irá desde el perímetro circunferencial del motor hacia el bowl.



**Figura 2.2:** Tipología de movimiento del gas en el cilindro de un MCIA  
Verdú Torres [7]

Dependiendo del motor que se esté analizando y su configuración de la cámara de combustión, dominarán unos movimientos u otros. En los MEC, la turbulencia se crea esencialmente debido a los movimientos de swirl y squish, y en los MEP, se produce principalmente por el de tumble.

Dado que el motor empleado en este proyecto es MEP, el patrón de movimiento principal será de tumble, siendo este el único que se va a estudiar a excepción del movimiento del pistón.

En la primera parte de la carrera admisión, estando las válvulas de admisión abiertas, la mezcla aire-combustible entra en el cilindro a altas velocidades dada la diferencia de presiones existente entre el colector y la cámara. Debido a las paredes que componen la camisa, la trayectoria del fluido se verá modificada y a causa del descenso del pistón, se creará un vórtice cada vez más grande hasta llegar a unas dimensiones de diámetro del orden de las del pistón. Durante este proceso, el fluido aumenta su momento cinético.

En la segunda fase de admisión, con el comienzo de cierre de válvulas, el momento cinético del fluido se reducirá levemente debido a la disminución de masa aportada y por el rozamiento que se produce con las paredes de la camisa.

En la fase de compresión, conforme el pistón asciende, el espacio en la cámara se ve reducido y con él, el radio del vórtice. Además, al estar cerradas completamente las válvulas de admisión, se produce una pérdida de energía en el fluido por la fricción existente con las paredes (ya que no se ve compensada por la entrada de masa fresca).

### 2.2.3 Condiciones de funcionamiento de los ensayos

Cada ensayo definido durante el proyecto, se ha realizado estableciendo unas condiciones de funcionamiento iniciales para llevar a cabo su estudio. Se definen tres casos en cuanto a las condiciones termodinámicas y de la mezcla:

- **Condiciones de funcionamiento 1:** se tratan los mismos valores de temperatura y presión para los ensayos con hidrógeno y gas natural como combustible, los cuales se obtienen del modelado en CFD con gas natural. Además, se considera una mezcla estequiométrica ( $\lambda = 1$ ) a 1500 rpm, con la misma masa de aire atrapada ( $m_a = 703,34 \text{ mg/cc}$ ). En este punto, hay ciertas incoherencias al utilizar datos procedentes de otro ensayo en el cálculo, pero se ignoran por no influir en las conclusiones que se van a obtener.
- **Condiciones de funcionamiento 2:** se definen las mismas revoluciones por minuto, dosado relativo y masa de aire atrapada que en las condiciones de funcionamiento 1, pero en este caso, el análisis se realiza empleando los datos de temperatura y presión procedentes de cada ensayo simulado con CFD (sin modificarlos en postratamiento).
- **Condiciones de funcionamiento 3:** se sigue la estrategia del ítem anterior, pero modificando el exceso de aire. Se trabaja con una mezcla pobre ( $\lambda = 1,5$ ).

Cuando se trabaja en las condiciones de funcionamiento 1, se están asumiendo los mismos valores de presión y temperatura en los dos ensayos que componen el caso. Por esta razón, la densidad debe ser la misma, y como el volumen del motor no cambia, la masa total introducida en el cilindro debería ser igual para el hidrógeno y el gas natural. Si además se tiene en cuenta que la masa de aire atrapada coincide para ambos ensayos, y que se pretende ir a dosado estequiométrico, se puede apreciar como la ecuación resultante no es lógica, dado que está sobrerrestringida.

$$\rho = \frac{P \cdot PM}{R \cdot T} \longrightarrow \left[ \begin{array}{l} P_{GN} = P_H \\ T_{GN} = T_H \end{array} \right] \longrightarrow \rho_{GN} = \rho_H \quad (2.1)$$

$$m_{total} = \rho \cdot V \longrightarrow \left[ \begin{array}{l} \rho_{GN} = \rho_H \\ V_{GN} = V_H \end{array} \right] \longrightarrow m_{total,GN} = m_{total,H} \quad (2.2)$$

$$m_{total} = m_{comb} + m_{aire} \longrightarrow \left[ \begin{array}{l} m_{total,GN} = m_{total,H} \\ m_{aire,GN} = m_{aire,H} \\ \lambda = 1 \end{array} \right] \longrightarrow \text{Ec. sobrerrestringida} \quad (2.3)$$

Al evaluar los casos que trabajan en estas condiciones, se consideran las fracciones másicas pertenecientes a cada ensayo, ignorando así la incoherencia antes nombrada.

#### 2.2.4 *El ensayo de arrastre sin Tumble*

En este apartado, los ensayos parten del reposo de la mezcla aire-combustible en el modelado con CFD. El gas no presentará ningún movimiento al inicio del ciclo, por lo que la tendencia de la transmisión de calor se verá afectada.

Se realizan cuatro casos diferentes:

- **Caso 1 (estático + iso-pT + local):** trabaja en las condiciones de funcionamiento 1. Se pretende observar el efecto que produce el cambio de gas natural a hidrógeno en las propiedades termo-físicas con los mismos datos de presión y temperatura.
- **Caso 2 (estático + pT + local):** se realiza en las condiciones de funcionamiento 2. El propósito de este ensayo es observar el efecto combinado de la composición y la diferencia de presiones y temperaturas (debido a que en el motor real el cambio de combustible supone una modificación de las condiciones de llenado del cilindro) en el cálculo del coeficiente de película. Además, se van a estudiar las consecuencias del uso de la velocidad del gas local del CFD en las tendencias de  $h$ .
- **Caso 3 (estático + iso-pT + global +  $c_m$ ):** se considera el ciclo en las condiciones de funcionamiento 1 y se computa el movimiento del gas mediante la ecuación de la velocidad lineal media del pistón. Se verá el efecto del cambio de combustible en las mismas condiciones de presión y temperatura, además del cambio que supone en la evolución del coeficiente de película el utilizar  $c_m$  como la velocidad del gas. El desarrollo de este caso, aunque necesario durante la ejecución de los cálculos para entender en mayor profundidad el funcionamiento del sistema, no proporciona resultados significativos en cuanto al cálculo del coeficiente de película. Por ello, se emplea para corroborar deducciones obtenidas en otros ensayos y su explicación se haya en el anexo.
- **Caso 4 (estático + pT + global +  $c_m$ ):** sigue la estrategia del ensayo 2, combinándola con el cálculo del movimiento del gas mediante la ecuación de la velocidad lineal media del pistón. El objetivo de este test es observar los cambios en el cálculo del coeficiente de película al obtener la velocidad del gas a partir de la velocidad lineal media del pistón.

La diferenciación entre utilizar ecuaciones en el cálculo de la velocidad del gas en lugar de emplear los datos de CFD tiene dos razones fundamentales:

- En un banco de pruebas no se pueden obtener los valores de velocidades locales.
- Las ecuaciones de predicción del coeficiente de película, entre ellas la de Woschni y las dos propuestas que se describirán en apartados posteriores, se describen como modelos 0-D, es decir, modelos simples que realizan los cálculos mediante correlaciones experimentales basadas en datos globales.

**Tabla 2.1:** Ensayos sin movimiento de tumble

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>
Condiciones de funcionamiento	1	2	1	2
Velocidad del gas	CFD	CFD	Velocidad lineal media del pistón	Velocidad lineal media del pistón
Efecto a observar	Cambio de combustible	Cambio de P, T y combustible	Diferencia con el caso 1 por cálculo de la velocidad	Modificación en el cálculo de la velocidad del gas

### 2.2.5 *El ensayo de arrastre con Tumble*

Para obtener unos datos más realistas de lo que sería un ensayo de arrastre en un banco de pruebas, se introduce un movimiento inicial al gas durante la simulación del ensayo teórico con CFD. Esto se obtiene mediante la simulación previa en CFD del proceso de llenado y vaciado del cilindro y la utilización posterior de sus datos en el modelado del ciclo cerrado en arrastre.

En este apartado se consideran 3 casos:

- **Caso 5 (dinámico + iso-pT +  $v_g$  de tumble):** trabaja en las condiciones de funcionamiento 1, añadiendo un movimiento inicial del gas. Se pretende analizar el efecto del cambio de combustible cuando el ciclo de funcionamiento presenta movimiento de tumble.  
Este caso es similar al 3, durante el desarrollo del proyecto fue necesario su estudio pero a efecto de conclusiones, no aporta información nueva. Por ello se muestra en el anexo, para corroborar los resultados presentados en los demás casos.
- **Caso 6 (dinámico +  $v_g$  de tumble):** emplea las condiciones de funcionamiento 2, definiendo un movimiento del gas inicial de tipo tumble. Se desea examinar el efecto de esta clase de movimiento en la transferencia de calor.
- **Caso 7 (dinámico +  $v_g$  de tumble +  $\lambda = 1,5$ ):** se basa en las condiciones de funcionamiento 3, habiendo calculado la velocidad del gas considerando un movimiento del tipo tumble. En este apartado se valorará la diferencia presente en el coeficiente de película cuando se tiene una mezcla estequiométrica y una pobre.

**Tabla 2.2:** Ensayos con movimiento de tumble

	<b>Caso 5</b>	<b>Caso 6</b>	<b>Caso 7</b>
Condiciones de funcionamiento	1	2	3
Velocidad del gas	Correlación	Correlación	Correlación
Efecto a observar	Diferencia con el caso 3 por movimiento inicial del gas (tumble)	Introducción de un movimiento inicial del gas (tumble)	Exceso de aire con $\lambda = 1,5$

### 2.2.6 Acrónimos utilizados en las gráficas de comparación

Para no acumular demasiada información en los gráficos, se ha decidido utilizar una serie de acrónimos en las leyendas y así obtener una vista más clara. A continuación, se describen los acrónimos utilizados:

**Tabla 2.3:** Acrónimos utilizados en las leyendas

<b>Elemento</b>	<b>Acrónimo</b>
Hidrógeno	H
Gas natural	GN
Pistón	P
Camisa	CA
Culata	CU
Woschni	WO
Propuesta 1	P1
Propuesta 2	P2
CFD	CFD
CoolProp	CP

## 2.3 Herramientas utilizadas

### 2.3.1 CFD

Dada la complejidad que presenta el cómputo experimental de la transferencia de calor en un motor y que el propósito de este trabajo no es alcanzar una alta precisión de cálculo si no observar si los modelos siguen la correcta tendencia ante cambios en el combustible y en el dosado relativo de la mezcla, se utiliza la simulación CFD como aproximación a la realidad.

El CFD se utiliza para estudiar el comportamiento de fluidos dinámicos mediante ordenador, habiendo definido las características del sistema a estudiar. En este caso se simula el entorno del cilindro de un motor, diferenciando tres partes principales: el pistón, la camisa y la culata.

Centrando el cálculo del programa en la obtención de propiedades que sean necesarias para llevar a cabo el estudio de la transferencia de calor, se obtienen diversos parámetros, entre los cuales los más importantes y que se aplicarán en los modelos, son:

- **Velocidad del gas:** en los dos primeros casos analizados se utiliza la velocidad del gas cerca de la pared para el pistón, la camisa y la culata. Aunque este dato no se podrá obtener en ensayos reales, CFD recurre a él para el cálculo de otras propiedades. Su utilidad reside en constatar que en los modelos 0-D se han de hacer hipótesis simplificadoras respecto a la velocidad que no son comparables con la velocidad real.
- **Fracciones másicas de cada especie:** sirven para ponderar la importancia de cada especie a la hora de calcular las propiedades termo-físicas en cada ensayo. Se emplearán las fracciones másicas globales de cada fluido, ya que la mezcla será homogénea en todo el cilindro por no presentar un frente de llama que la modifique y por realizar la inyección de combustible en el puerto de admisión.
- **Temperatura:** se extraerán los datos de las temperaturas locales y globales. Cada modelo se obtendrá con ambas para comprobar las diferencias existentes.
- **Presión:** se emplearán las presiones globales, dado que estas y las locales son iguales.

Además, con el objetivo de comparar los cálculos obtenidos de forma analítica, se van a obtener, mediante posprocesamiento, los siguientes parámetros:

- Los números de Reynolds, Nusselt y Prandtl.
- Las propiedades termo-físicas: densidad, conductividad térmica, viscosidad dinámica y calor específico a presión constante.
- El coeficiente de película.

### ***2.3.2 CoolProp***

CoolProp [8] es una aplicación informática que permite el cálculo de propiedades químicas y termo-físicas de distintos elementos basándose en datos de presión y temperatura, entre otros. Introduciendo los datos obtenidos mediante CFD de fracciones másicas, presión y temperatura, se computan las propiedades de densidad, conductividad térmica, viscosidad dinámica y calor específico a presión constante.

### ***2.3.3 CALMEC***

CALMEC es un programa desarrollado por el CMT que se utiliza para el diagnóstico de la combustión en motores. En este caso se ha empleado el submodelo correspondiente a la transmisión de calor, más concretamente, el desarrollo a partir de la ecuación de Woschni.

#### **2.3.4 *Matlab***

Matlab se conoce como un sistema de cómputo numérico que emplea un lenguaje propio de programación. Esta herramienta se ha utilizado durante todo el desarrollo del proyecto, bien para hacer cálculos, como para realizar comparaciones gráficas o desarrollos de los modelos y propuestas.

#### **2.3.5 *Excel***

Las hojas de cálculo de Excel se han utilizado durante todo el desarrollo del proyecto junto con Matlab. Dependiendo de la tarea que se estuviera realizando en el momento y la necesidad de unas características de interfaz u otras, se ha elegido una de las dos herramientas.

Principalmente se han empleado ambos programas como base para utilizar CoolProp, el cual se podía descargar en ambos formatos.

# Marco teórico

### 3.1 Propiedades termo-físicas

#### 3.1.1 Número de Reynolds

Según Incropera [9], el número de Reynolds se define como el ratio adimensional entre las fuerzas de inercia, las cuales están asociadas con un aumento en el momento de los fluidos en movimiento, y las viscosas en una región característica de dimensión  $L$ . Además, este parámetro va a definir si el flujo del fluido es laminar o turbulento<sup>1</sup> y modificará el espesor de la capa límite de velocidad.

$$Re = \frac{F_i}{F_v} = \frac{\frac{\rho \cdot v_g^2}{L}}{\frac{\mu \cdot v_g}{L^2}} = \frac{\rho \cdot v_g \cdot L}{\mu} \quad (3.1)$$

Para valores bajos del número de Reynolds se espera que dominen las fuerzas viscosas y que por tanto, el flujo sea laminar y el espesor de la capa límite de velocidad sea mayor (las fuerzas viscosas serán lo suficientemente potentes como para mitigar cualquier perturbación). Sin embargo, para valores altos del número de Reynolds, las fuerzas viscosas pasarán a un segundo plano y las principales serán las de inercia. En este caso, el flujo será turbulento, ya que las perturbaciones no se verán suavizadas como en el caso anterior, y la capa límite será menor.

---

<sup>1</sup>El flujo laminar es aquel que sigue un movimiento ordenado, correspondiendo con velocidades bajas. El flujo turbulento es aquel en el que predomina el caos de las partículas. Va asociado a velocidades altas.

### 3.1.2 Número de Nusselt

El número de Nusselt mide la energía térmica transferida al fluido con respecto a la energía térmica conducida dentro del mismo, es decir, es la relación entre el calor transferido por convección y por conducción.

$$Nu = \frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{h \cdot \Delta T}{\frac{k_g \cdot \Delta T}{L}} = \frac{h \cdot L}{k_g} \quad (3.2)$$

Como se puede apreciar en (3.2), el calor por convección se calcula mediante la ley de enfriamiento de Newton, mientras que el calor por conducción se describe con la ley de conducción de Fourier.

Este parámetro adimensional es directamente proporcional al coeficiente de película, variable en la que se está interesado, y se puede relacionar con el número de Reynolds y el de Prandtl, considerando un flujo turbulento en el interior de un tubo o sobre un plato plano [10], mediante la siguiente ecuación:

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^c \quad (3.3)$$

Donde las constantes a, b y c se definen dependiendo de diversas correlaciones experimentales destinadas a predecir el flujo de calor.

### 3.1.3 Número de Prandtl

El número de Prandtl es el ratio adimensional entre la velocidad de difusión viscosa y térmica.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu \cdot \rho}{\frac{k_g}{c_p / \rho}} = \frac{\mu_g \cdot c_p}{k_g} \quad (3.4)$$

También se puede definir como el cociente entre las capas límite de la velocidad y temperatura. Para el aire y los gases de escape, el número de Prandtl siempre será menor a la unidad, lo que significa que la capa límite de la temperatura será más gruesa que la de velocidad, teniendo mayor importancia la transferencia de calor que la fluidodinámica [11].

A diferencia del número de Reynolds, el número de Prandtl no está subordinado a la geometría del objeto del problema, si no que únicamente depende del fluido y su estado.

La difusividad térmica ( $\alpha$ ) es el ratio entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica y se expresa en  $m^2/s$ . Mide la capacidad del material de conducir energía térmica en relación a la capacidad de almacenar esa misma energía. Los materiales que tengan  $\alpha$  grandes responden rápido a cambios de temperatura en el entorno, sin embargo, los sistemas que dispongan de  $\alpha$  pequeños, tardarán en dar respuesta a los cambios de temperatura.

La capacidad calorífica volumétrica es el producto  $\rho \cdot c_p$  y se mide en  $J/m^3 \cdot K$ . Indica la habilidad del material de almacenar energía térmica.

### 3.1.4 Densidad

La densidad es la magnitud que representa la cantidad de masa de una sustancia presente en un volumen determinado y se mide en el Sistema Internacional (SI) en  $kg/m^3$ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.5)$$

Esta propiedad es fuertemente dependiente de la sustancia que se esté analizando y del estado en el que se encuentre, ya que variará dependiendo del peso molecular de los átomos que la compongan y del estado de agregación, es decir, de las uniones que forman las moléculas entre sí (las uniones más fuertes irán ligadas a densidades más altas).

Además, también se verá modificada por cambios en la presión. A mayor presión, las moléculas que componen el cuerpo a estudiar se compactarán, de forma que su unión será mayor y por tanto, su densidad aumentará.

Otro parámetro que afecta a la densidad es la temperatura. Un incremento en ella, supondrá una mayor agitación y dispersión de las moléculas, lo que provocará uniones más débiles entre ellas y como consecuencia, menores densidades.

Estas relaciones se pueden consultar en la ecuación de los gases perfectos. Mientras que la presión es directamente proporcional a la densidad, la temperatura lo es inversamente.

$$P = \rho \cdot R \cdot T \quad (3.6)$$

Esta fórmula se puede reordenar, obteniendo así la relación entre la densidad y el peso molecular:

$$\rho = \frac{P \cdot PM}{R \cdot T} \quad (3.7)$$

### 3.1.5 Calor específico a presión y volumen constante

Pertenecen a las propiedades termodinámicas del sistema, las cuales definen el estado de equilibrio.

El calor específico se define como la cantidad de calor que se le debe aportar a una unidad de masa para que esta suba en una unidad su temperatura y se miden en el SI en  $J/kg \cdot K$ . Este proceso se puede llevar a cabo a presión constante ( $c_p$ ) o a volumen constante ( $c_v$ ).

Existen dos formas diferentes de relacionar ambos calores específicos, bien mediante la constante de los gases ideales ( $R$ ) o mediante el coeficiente de dilatación adiabática ( $\gamma$ ).

$$c_p = c_v + R \quad (3.8)$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.9)$$

Además, el calor específico se puede obtener a partir del calor absorbido, el delta de temperaturas y la masa de fluido (o moles del fluido en el caso de medición molar) de la siguiente forma:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.10)$$

A este término también se le conoce como capacidad calorífica específica o capacidad térmica específica.

### 3.1.6 Conductividad térmica

La conductividad térmica se refiere a la habilidad intrínseca de un material de conducir el calor. Esta propiedad se da a través de la agitación molecular y el contacto entre moléculas. Sus unidades en el SI son  $W/m \cdot K$ .

Su valor varía de manera sustancial entre distintos materiales y depende de forma significativa de la estructura que estos posean. Cuando se trabaja con materiales isotrópicos, será homogénea en todo el objeto, mientras que cuando se esté trabajando con un material anisotrópico, variará dependiendo de la dirección del flujo. Además, también habrán grandes diferencias según el estado que presente el sistema a estudiar, siendo los gases los de peor conductancia, seguido de los líquidos y finalizando por los sólidos.

La conductividad en fluidos es directamente proporcional a la densidad del gas, la velocidad media de las moléculas y a la distancia promedio recorrida por una molécula antes de la colisión.

$$k = \frac{1}{3} \cdot c_v \cdot \rho \cdot a \cdot \lambda_{mpf} \quad (3.11)$$

También es muy dependiente de la temperatura, cuando esta sea alta se producirá un mayor movimiento de partículas, las cuales transmitirán mayor cantidad de calor.

En cuanto a la presión, la densidad y  $\lambda_{mpf}$  son directa e inversamente proporcionales a ella, por lo que la conductividad es independiente de este parámetro excepto en casos extremos.

### 3.1.7 Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica, o absoluta, es aquella que muestra la resistencia interna de las moléculas de un fluido en movimiento, indicando las fuerzas que lo deforman o mueven y se mide en Poises ( $P = Pa \cdot s$ ).

Es fuertemente dependiente de la unión que exista entre sus moléculas (será mayor cuanto más densa sea la red formada por ellas). Como consecuencia, los sólidos serán los que presentarán mayores viscosidades, seguidos de los líquidos y finalmente de los gases.

Esta característica se puede obtener a partir de la Ley de Newton de la viscosidad, la cual se obtiene de un experimento en el que se introdujo un líquido entre dos placas, una en movimiento y otra fija.

$$F_t = \mu \cdot \frac{A \cdot v}{e} \quad (3.12)$$

Como se puede apreciar en (3.12), el desplazamiento del fluido que se considera en este cálculo es el tangencial dado que no hay movimiento en la dirección normal a la superficie. Los líquidos se deslizan en capas, de forma que la capa que se encuentra directamente en contacto con el objeto sólido tendrá velocidad nula, mientras que conforme se va tomando distancia con la superficie, la velocidad irá aumentando.

### 3.1.8 Coeficiente de película

Cuando se define la transferencia de calor por convección, el parámetro por excelencia es el coeficiente de película,  $h$ .

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T - T_p) \quad (3.13)$$

La obtención de este parámetro se puede llevar a cabo de dos formas diferentes: de forma analítica o con correlaciones semiempíricas. En general se utilizan las correlaciones para su cómputo dado que solamente se podrá calcular de forma analítica en casos muy sencillos.

El valor de este parámetro depende de:

- Las propiedades del fluido y del material sólido.
- Las condiciones existentes en la capa límite teniendo en cuenta el campo de velocidades del fluido, las propiedades termodinámicas y las propiedades de transporte del fluido.
- La geometría del problema.

Para tener un mayor control sobre las variables analizadas, se decide basar el cálculo y las conclusiones del trabajo en el coeficiente de película, dado que el cómputo del calor transferido conlleva mayores incertidumbres (fundamentalmente por la determinación de la diferencia de temperaturas).

## 3.2 Modelo de Woschni de transferencia de calor en MCIA

Woschni [5] parte de la ecuación (3.3) en el desarrollo de su modelo de transferencia de calor, definiendo un número de Prandtl igual a 0,7 que se incluye en la constante  $a = 0,035$ . Además, define la constante  $b$  como 0,8.

$$Nu = 0,035 \cdot Re^{0,8} \quad (3.14)$$

A lo largo de su artículo, describe diferentes suposiciones para llegar a su fórmula final, entre ellas:

- Trabaja con un motor diésel, por lo que este modelo puede predecir con menor exactitud otros tipos de combustibles.
- Considera el diámetro del pistón como la longitud característica.

- Dado que la viscosidad dinámica y la conductividad térmica son independientes de la presión, las calcula mediante correlaciones experimentales con la temperatura.

$$k \propto cte \cdot T^{0,75} \quad (3.15)$$

$$\mu \propto cte \cdot T^{0,62} \quad (3.16)$$

Ambas constantes descritas en (3.15) y (3.16) las introduce en el término  $a$  que engloba todas las suposiciones.

- Para el cómputo de la presión, se vale de la ecuación de los gases ideales (3.6).
- Considera la velocidad media del gas como el sumatorio de tres términos: uno referente al movimiento del pistón en el cilindro, otro que corresponde al movimiento de swirl y uno último que representa la combustión.

$$v_g = C_{w1} \cdot c_m + C_{w2} \cdot \bar{c}_u + C_2 \cdot \frac{V_d T_{IVC}}{P_{IVC} V_{IVC}} \cdot (P - P_m) \quad (3.17)$$

Donde  $C_{w1}$ ,  $C_{w2}$  y  $C_2$  son constantes de ajuste,  $c_m$  es la velocidad lineal media del pistón,  $\bar{c}_u$  es la velocidad media tangencial generada por el movimiento de swirl y  $T_{IVC}$ ,  $P_{IVC}$  y  $V_{IVC}$  son la temperatura, la presión y el volumen en el punto de cierre de la válvula de admisión.

En el posterior empleo de la ecuación de Woschni, se utilizará la velocidad del gas proporcionada por CFD o dos ecuaciones analíticas que parten de (3.17) y se adaptan mejor a las condiciones estudiadas del fluido. Ambas fórmulas serán explicadas en el apartado 3.6.

Finalmente, a partir de la expresión (3.14) y con las hipótesis descritas, se define la ecuación de Woschni como:

$$h = 0,012 \cdot D^{-0,2} \cdot T^{-0,55} \cdot P^{0,8} \cdot v_g^{0,8} \quad (3.18)$$

Estando todas las unidades expresadas en el SI.

### 3.3 Desarrollo de la Propuesta 1

En la elaboración de esta primera propuesta, se parte de la misma ecuación de la que parte Woschni, es decir, de la ecuación (3.14). Como se ha explicado anteriormente, para llegar a esa afirmación, se debe suponer un número de Prandtl constante e igual a 0,7 y un valor de  $b = 0,8$ .

A continuación, se sustituyen los números de Reynolds y Nusselt por sus correspondientes definiciones, (3.1) y (3.2). De forma que se obtiene:

$$\frac{h \cdot D}{k_g} = 0,035 \cdot \left( \frac{\rho \cdot v_g \cdot D}{\mu} \right)^{0,8} \quad (3.19)$$

Reordenando los términos, se obtiene la ecuación que representa la propuesta 1:

$$h = 0,035 \cdot (\rho_g \cdot v_g)^{0,8} \cdot D^{-0,2} \cdot \mu_g^{-0,8} \cdot k_g \quad (3.20)$$

Para el cómputo de las propiedades termo-físicas se han seguido diferentes estrategias:

- **Densidad:** se utiliza la ley de los gases perfectos, ponderando la importancia de cada especie en el cálculo del peso molecular de la mezcla.

$$\rho = \frac{P}{\frac{R}{PM_{mezcla}} \cdot T} \quad (3.21)$$

Calculándose de la siguiente forma el peso molecular de la mezcla:

$$PM_{mezcla} = \sum_i X_i \cdot PM_i \quad (3.22)$$

O bien:

$$PM_{mezcla} = \frac{1}{\sum_i \frac{Y_i}{PM_i}} \quad (3.23)$$

Siendo la relación entre la composición másica y molar:

$$X_i = Y_i \cdot \frac{PM_{mezcla}}{PM_i} \quad (3.24)$$

- **Viscosidad dinámica:** se calcula la propiedad específica para cada especie y se pondera su peso mediante sus fracciones másicas.

$$\mu = \mu_{comb} \cdot Y_{comb} + \mu_{O_2} \cdot Y_{O_2} + \mu_{N_2} \cdot Y_{N_2} \quad (3.25)$$

- **Conductividad térmica:** según Zhukov y Pätz [12], existen diversas formas de ponderar el peso de cada especie cuando se calcula la conductancia global de una mezcla, cada una con distintos grados de precisión. En dicho artículo se describen dos ecuaciones que representan fielmente los ensayos realizados, ambas con errores menores al 5%, siendo estas la de Mathur et al. y la de Mason y Saxena. En este proyecto se utiliza la expresión empírica planteada por Mathur et al. por la mayor simplicidad de cálculo y buenos resultados que presenta.

$$k_g = \frac{1}{2} \cdot \left[ \sum_i X_i k_i + \left( \sum_i \frac{X_i^{-1}}{Y_i} \right) \right] \quad (3.26)$$

Los valores de cada propiedad para cada especie se obtienen a partir de CoolProp y utilizando las unidades definidas en el SI, introduciendo la especie que se quiere obtener y la temperatura y presión a la que está en cada instante.

### 3.4 Desarrollo de la Propuesta 2

En esta propuesta se pretende evaluar si es correcta la suposición realizada por Woschni de que el número de Prandtl apenas variaba durante el ciclo y se podía considerar constante e igual a 0,7. Por ello, para comenzar el desarrollo, se remonta a la ecuación anterior a la escogida por Woschni, es decir, la ecuación (3.3).

Sustituyendo cada número adimensional por su respectiva definición, se obtiene:

$$\frac{h \cdot D}{k_g} = a \cdot \left( \rho \cdot \frac{v_g \cdot D}{\mu_g} \right)^b \cdot \left( \mu_g \cdot \frac{c_p}{k_g} \right)^c \quad (3.27)$$

Reorganizando los términos:

$$h = a \cdot (\rho \cdot v_g)^b \cdot D^{(b-1)} \cdot \mu_g^{(c-b)} \cdot c_p^c \cdot k_g^{-(c-1)} \quad (3.28)$$

Para determinar los valores de las constantes b y c, se emplea la correlación publicada por Dittus y Boelter [13]. Esta ecuación está diseñada para flujos turbulentos en tubos de superficie lisa, cuyas características son:

- El número de Prandtl tiene que encontrarse en el intervalo [0,6 – 160]
- El número de Reynolds debe ser mayor a 10000
- El ratio longitud/diámetro (L/D) debe ser mayor a 10.

A pesar de que el cilindro de un MCI no cumple con estas condiciones estrictamente, esta es la correlación más extendida en la definición del número de Nusselt ya que no se han hecho experimentos suficientes en este área para conseguir una correlación que produzca errores menores. Por lo tanto, se asumen los valores de:

- $b = 0,8$
- La constante c puede tener dos valores según el proceso al que se someta el fluido:
  - \* Si el fluido se está enfriando:  $c = 0,3$
  - \* Si el fluido se está calentando:  $c = 0,4$ .

De esta forma, se obtiene la siguiente modificación de la ecuación (3.28):

$$h = a \cdot (\rho \cdot v_g)^{0,8} \cdot D^{-0,2} \cdot \mu_g^{-0,5} \cdot c_p^{0,3} \cdot k_g^{0,7} \quad (3.29)$$

Para finalizar el cálculo del coeficiente de película se necesita el valor de la constante a. Aunque Dittus y Boelter dan un valor también para esta constante, se decide utilizar uno diferente para escalar esta propuesta y que sea comparable con la de Woschni y la propuesta 1.

Para obtener el nuevo valor de a, se aplica la siguiente igualdad:

$$0,035 = a \cdot Pr^c \quad (3.30)$$

A partir de esta ecuación, se obtiene un valor de  $a = 0,03895$  considerando:

- Woschni supuso un  $Pr = 0,7$
- Se ha definido  $c = 0,3$ .

Por lo tanto, la propuesta 2 se define como:

$$h = 0,03895 \cdot (\rho \cdot v_g)^{0,8} \cdot D^{-0,2} \cdot \mu_g^{-0,5} \cdot c_p^{0,3} \cdot k_g^{0,7} \quad (3.31)$$

### 3.5 Cálculo del coeficiente de convección mediante CFD

Para el cálculo del coeficiente de película, se siguen dos líneas de acción diferentes en este proyecto:

- En CFD, por su configuración, se calcula la transmisión de calor en el pistón, la camisa y la culata a partir de las condiciones de contorno que se definan y la función de pared elegida. A partir de estos datos, las áreas de cada componente y la diferencia de temperaturas entre la pared y el gas en contacto con ellas, se despeja la  $h$  en posprocesamiento.

$$CFD \rightarrow \dot{Q} \rightarrow h$$

- En el cálculo mediante la ecuación de Woschni y las propuestas 1 y 2, se utilizan expresiones analíticas que utilizan las propiedades termo-físicas y las características de presión, temperatura y fracciones másicas para obtener el coeficiente de película. Si, a continuación, se quiere obtener el flujo de calor, se utilizará la ecuación (3.13).

$$Propiedades \rightarrow h \rightarrow \dot{Q}$$

Además, dependiendo del modelo de función de pared que se defina a la hora de realizar la simulación, CFD puede mostrar unos valores u otros del coeficiente de película. Esto supone que no se pueda asumir como precisos los resultados en términos absolutos dados por esta herramienta, pero se pueden tomar como referencia para las tendencias e incrementos producidos entre un tipo de combustible y otro.

Por estas dos razones principales, durante el documento no se razonará cual de las propuestas refleja con mayor o menor exactitud los datos de CFD, sino que se realizarán unas primeras aproximaciones a las curvas y se compararán diferencias relativas entre ellas.

### 3.6 Desarrollo de la correlación de velocidad

Woschni utiliza en el desarrollo de su modelo de transferencia de calor la ecuación (3.17) para definir la velocidad que lleva la mezcla aire-combustible en el interior del cilindro. El autor considera la velocidad media tangencial por el movimiento de swirl constante e igual a:

$$\bar{c}_u = \pi \cdot D \cdot N_T \quad (3.32)$$

Donde  $N_T$  se refiere a la frecuencia del vórtice de swirl, la cual se obtiene experimentalmente.

Según Olmeda y col. [14], si se está trabajando con un MEP, esta ecuación se puede mejorar considerando el movimiento de tumble en lugar del de swirl, cambiando el término constante  $\bar{c}_u$  por una correlación que cuantifique su evolución instantánea.

$$v_g = C_{w1} \cdot c_m + C_{w2} \cdot \bar{v}_m \cdot f_w + C_2 \cdot \frac{V_d T_r}{P_r V_r} \cdot (P - P_m) \quad (3.33)$$

Siendo  $\bar{v}_m$  la velocidad media característica del gas y  $f_w$  una función en forma de S con valores entre 0 y 1.

La velocidad media característica del gas se puede describir como:

$$\bar{v}_m = \pi \cdot D \cdot CTM \cdot n \quad (3.34)$$

Donde  $CTM$  es el coeficiente de torbellino medio, el cual representa la relación entre la vorticidad angular de la carga en el cilindro cuando termina la admisión y la velocidad angular del motor hipotético para el que se representa el proceso en un banco de flujo. Este parámetro se mide experimentalmente y para las condiciones del motor evaluado tiene un valor de 3,5.

Mientras que  $f_w$  se define como:

$$f_w = e^{-c_1 \cdot \left( \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_f - \alpha_0} \right)^m} \quad (3.35)$$

Esta función se compone de diversas constantes de ajuste que se deberán determinar dependiendo del ensayo y motor que se vaya a analizar.

- $c_1$ : debe asegurar una disipación del 99,9 % de la velocidad de tumble cuando  $\alpha = \alpha_f$
- $\alpha_f$ : se define como el ángulo final del cigüeñal en el ensayo
- $\alpha_0$ : simboliza el ángulo inicial del cigüeñal en el ensayo
- $m$ : es una constante de ajuste para adaptar la forma de  $f_w$ .

En los casos 3 y 4, se ha especificado que se utiliza el cálculo analítico de la velocidad del gas y que en él, no se tiene en cuenta el movimiento de tumble. Por tanto, la ecuación de la velocidad del gas se va a ver reducida únicamente al primer término:

$$v_g = C_{w1} \cdot c_m = C_{w1} \cdot (2 \cdot S \cdot n) \quad (3.36)$$

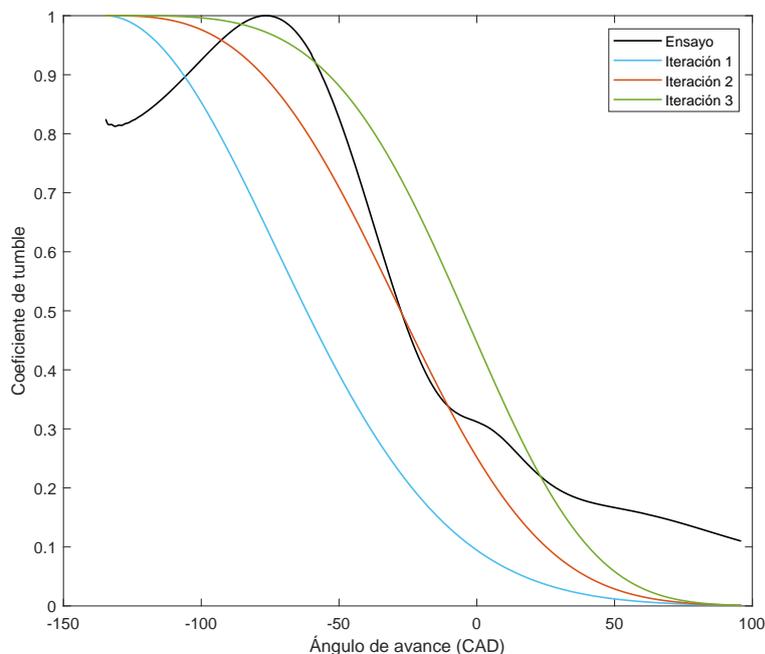
Para los casos 5 y 6, se considera, además del movimiento del pistón, el inicial del gas. Por ello, en estos dos experimentos, se calcula la velocidad del gas como la suma de los dos primeros términos:

$$v_g = C_{w1} \cdot c_m + C_{w2} \cdot \bar{v}_m \cdot f_w \quad (3.37)$$

Para el cálculo de la función  $f_w$  se obtiene el valor del coeficiente de tumble de CFD y se ajusta la fórmula (3.35) a su forma. A continuación se describen las iteraciones realizadas en este punto para conseguir la función que mejor se adapte a las condiciones de funcionamiento escogidas:

**Tabla 3.1:** Iteraciones en el ajuste de la función  $f_w$

	$\alpha_f$	$\alpha_0$	$m$
Iteración 1	-135	96	2
Iteración 2	-135	96	3
Iteración 3	-135	96	4



**Figura 3.1:** Ajuste de la función  $f_w$  a los datos experimentales

Se decide utilizar el ajuste definido en la segunda iteración, teniendo un error máximo del 18%. Aunque la función no se adapta a la perfección a la evolución del coeficiente de tumble, se considera que el error producido es aceptable dadas las mejoras que supone su empleo en el cálculo de  $h$ .

Según Martín [15], las constantes  $C_{w1}$  y  $C_{w2}$  están relacionadas por el cociente  $r_w$ . En el documento, después de la realización de diversos ensayos, se llega a la conclusión de que el valor de este cociente no varía mucho a pesar de las diferencias existentes en el tamaño de los motores, por lo que se decide utilizar un valor promedio con el que luego ajustar las constantes:

$$r_w = \frac{C_{w1}}{C_{w2}} = 1,7 \quad (3.38)$$

Además, según Carreño [16], se puede definir  $C_{w1}$  mediante la caracterización del motor (descrita en dicho documento). De esta forma se puede definir  $C_{w1} = 2,5$ .

Finalmente, se describen los resultados de las constantes definidas y la ecuación completa de la velocidad del gas utilizada en los ensayos con movimiento de tumble:

**Tabla 3.2:** Constantes ajustadas en la ecuación de velocidad

Constante	Valor
CTM	3,5
$\alpha_0$	-135
$\alpha_f$	96
m	3
$C_{w1}$	2,5
$C_{w2}$	1,4706

$$v_g = 2,5 \cdot (2 \cdot S \cdot n) + 1,4706 \cdot (3,5 \cdot \pi \cdot D \cdot n) \cdot \left[ e^{-6,908 \cdot \left( \frac{\alpha + 135}{96 + 135} \right)^3} \right] \quad (3.39)$$

# Estudio de la transferencia de calor en arrastre sin Tumble

## 4.1 Efecto del cambio de combustible a misma presión, temperatura y velocidad del gas

### 4.1.1 Características del caso

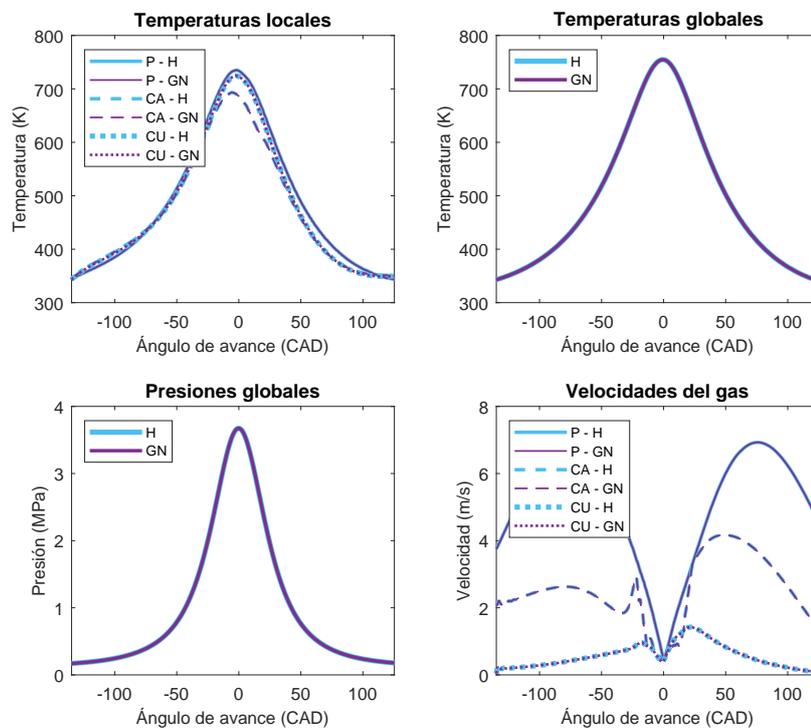
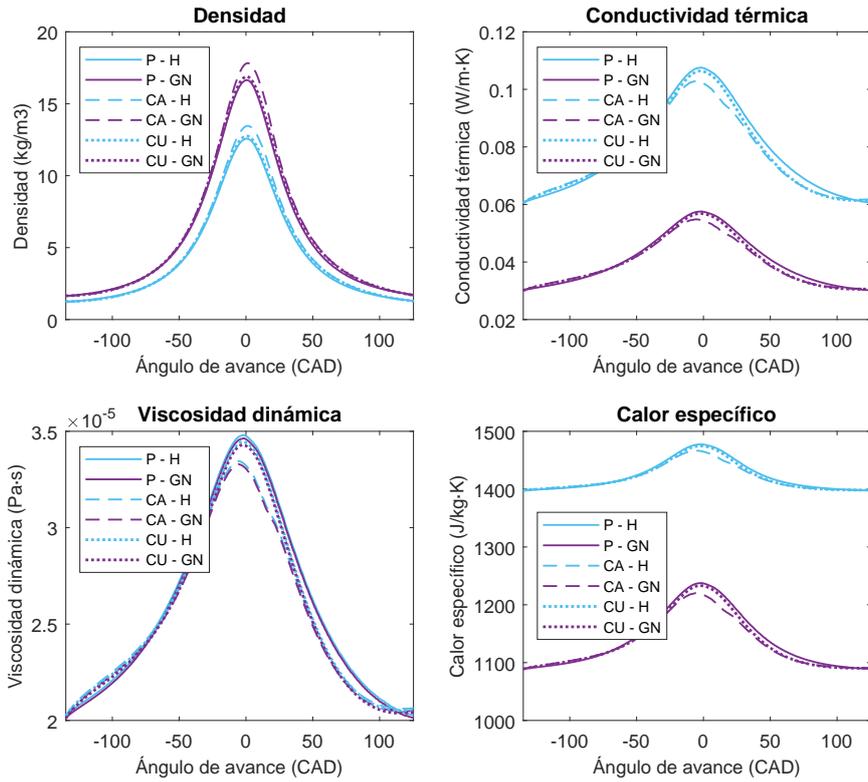


Figura 4.1: Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 1

Para este primer análisis, se quiere comprobar la diferencia existente en las propiedades termo-físicas del hidrógeno y gas natural cuando se tratan las mismas condiciones de presión y temperatura. Con esta finalidad, se decide utilizar el caso 1 (figura 4.1) debido a que presenta los mismos datos de P y T y, al utilizar los valores de la velocidad del gas de CFD, no supone una gran complejidad de cálculo.

#### 4.1.2 Comparación de propiedades



**Figura 4.2:** Propiedades termo-físicas para el hidrógeno y el gas natural en el caso 1

A partir de estos resultados se pueden extraer diversas conclusiones, algunas que coinciden con la literatura y otras que no concuerdan con las suposiciones realizadas por Woschni.

La diferencia observable en la figura 4.2 en la densidad puede ser fácilmente explicada mediante la ecuación de los gases perfectos (3.7). Al disponer de los mismos datos de presión, temperatura y  $R$  universal, el único factor que diferencia una densidad de otra es el peso molecular. Como el metano dispone de un  $PM$  mayor que el hidrógeno, es lógico que la densidad del gas natural esté siempre por encima de la del hidrógeno.

$$PM[CH_4] = PM[C] + 4 \cdot PM[H] = 12 + 4 \cdot 1 = 16 \text{ g/mol}$$

$$PM[H_2] = 2 \cdot PM[H] = 2 \cdot 1 = 2 \text{ g/mol}$$

Pero para valorar esta desigualdad, no solo se debe tomar en consideración el peso molecular del combustible, si no que el aire también juega un papel importante. Por tanto, para cuantificar el incremento se debe emplear la ecuación (3.23).

$$PM_H = \frac{1}{\frac{Y_{H_2}}{PM_{H_2}} + \frac{Y_{O_2}}{PM_{O_2}} + \frac{Y_{N_2}}{PM_{N_2}}} = 20,86 \text{ g/mol} \quad (4.1)$$

$$PM_{GN} = \frac{1}{\frac{Y_{CH_4}}{PM_{CH_4}} + \frac{Y_{O_2}}{PM_{O_2}} + \frac{Y_{N_2}}{PM_{N_2}}} = 27,62 \text{ g/mol} \quad (4.2)$$

Es decir, calculando el incremento de densidad entre el ensayo de hidrógeno y el de gas natural con los datos obtenidos de CFD y los datos del peso molecular descritos anteriormente, el resultado debe ser el mismo, como se muestra en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Incremento de la densidad por el cambio de combustible

Forma de cálculo	Incremento de $\rho$ (%)
CFD	32,41 %
$PM_{mezcla}$	32,41 %

En cuanto a la viscosidad dinámica, se puede afirmar que la suposición que toma Woschni especificando que es únicamente dependiente de la temperatura (3.16) se puede extrapolar también a la utilización del hidrógeno como combustible. Empleando ambos ensayos los mismos datos de temperatura, los valores de  $\mu$  son prácticamente idénticos, teniendo un error máximo entre ellos menor al 1 % en todas las zonas definidas.

Sin embargo, el caso de la conductividad térmica no es igual. En las mismas condiciones de funcionamiento que la viscosidad dinámica y habiendo definido una suposición similar (3.15), las conductancias del hidrógeno y del gas natural difieren. Esto quiere decir que la hipótesis realizada por Woschni para los carburantes no es, en principio, extrapolable al hidrógeno debido a la ausencia de cadenas de carbono en este elemento. Por tanto, es conveniente calcular esta propiedad de forma analítica en lugar de utilizar correlaciones con la temperatura.

Finalmente, para poder analizar las consecuencias que tiene el cambio de combustible en el calor específico a presión constante, se debe saber el peso del hidrógeno y gas natural cuando se calcula esta propiedad (se va a estudiar únicamente para un ángulo de avance al azar,  $-23 \text{ CAD}$ , ya que las deducciones alcanzadas serán extrapolables a todos los puntos).

Dado que se está trabajando con la misma masa de aire atrapada y a dosado estequiométrico, la cantidad necesaria de combustible en cada caso será diferente. Por ello, se necesita saber qué porcentaje del calor específico global es debido al combustible en cada caso. Con esta finalidad, se describe en las tablas 4.2 y 4.3 el cálculo del calor específico término a término.

**Tabla 4.2:**  $c_p$  para el caso del hidrógeno

	$c_p$	=	$Y_{H_2} \cdot c_p(H_2)$	$Y_{aire} \cdot c_p(aire)$
Valores	1458,570	=	416,000	1042,572
Porcentaje (%)	100	=	28,52	71,48

**Tabla 4.3:**  $c_p$  para el caso del gas natural

	$c_p$	=	$Y_{H_2} \cdot c_p(H_2)$	$Y_{aire} \cdot c_p(aire)$
Valores	1206,873	=	192,917	1013,955
Porcentaje (%)	100	=	15,98	84,02

El  $c_p$  del ensayo del hidrógeno se puede definir como:

$$c_p(EnsayoH) = \frac{Y_{H_2} \cdot c_p(H_2)}{\%H_2} \quad (4.3)$$

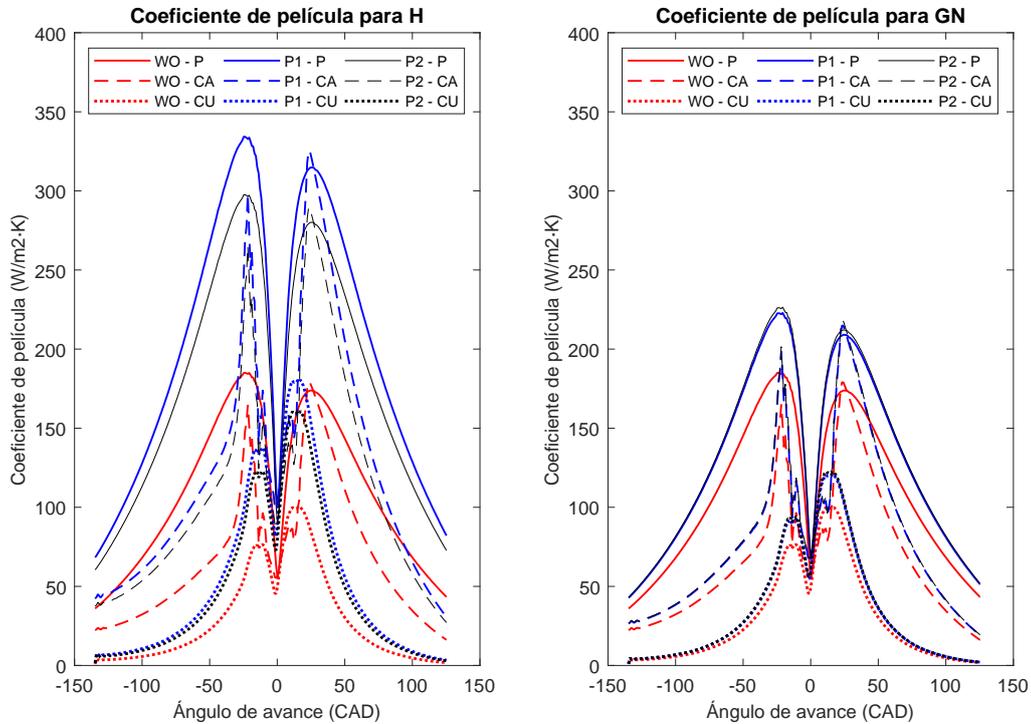
Y siguiendo el mismo razonamiento, se calcula el  $c_p$  del ensayo de gas natural como:

$$c_p(EnsayoGN) = \frac{Y_{CH_4} \cdot c_p(CH_4)}{\%CH_4} \quad (4.4)$$

Por lo tanto, se puede observar que el incremento del 20.8% observable en la gráfica, en el punto de cálculo, es debido al cambio de combustible:

$$\frac{c_p(EnsayoH)}{c_p(EnsayoGN)} = \frac{Y_{H_2} \cdot c_p(H_2)}{Y_{CH_4} \cdot c_p(CH_4)} \cdot \frac{\%CH_4}{\%H_2} = 1,208 \quad (4.5)$$

#### 4.1.3 Comparación del coeficiente de película



**Figura 4.3:** Coeficiente de película local para el hidrógeno y el gas natural en el caso 1

Debido a la modificación en postratamiento del ensayo del hidrógeno con la finalidad de comparar resultados para los mismos datos de presión y temperatura, en la figura 4.3 no aparece la evolución del coeficiente de película con el tiempo obtenida por CFD (al estar calculado para una información de entrada diferente).

Dadas las tendencias anómalas (la curva representa cerca del PMS unos valores reducidos debido a la definición de una velocidad del gas prácticamente nula por estar el pistón parado en ese punto) que presentan los modelos en el cálculo de la  $h$  para los datos de entrada definidos (y que se explicarán en el apartado 4.3), es ilógico estudiar los incrementos presentes en el coeficiente de convección cuando se cambia de gas natural a hidrógeno en este punto. Sin embargo, se pueden obtener conclusiones a cerca del funcionamiento de la ecuación de Woschni.

Como se ha presentado en el apartado anterior, para las mismas condiciones de  $P$  y  $T$ , las propiedades termo-físicas cambian si se modifica el combustible, lo que implicará una alteración en el valor de la  $h$ . Ahora bien, si se comparan las curvas obtenidas por la ecuación de Woschni para los ensayos de hidrógeno y gas natural, se aprecia un incremento máximo menor al 0.06 %, es decir, el modelo de predicción no percibe ningún cambio.

Si se analiza la ecuación (3.18), esta solo es dependiente de la temperatura, la presión, el diámetro y la velocidad del gas. Dado que en este ensayo se han definido las mismas condiciones para las tres primeras y la velocidad del gas se define mediante CFD y no varía entre un ensayo y otro, es lógico que la ecuación de Woschni no sea capaz de representar el cambio en el combustible. Esto se da porque su autor realizó una serie de correlaciones y simplificaciones para llegar a ella que son correctas en el caso de ciertos combustibles, pero no son, de forma general, extrapolables a otros.

Por lo tanto, a pesar de no poder razonar todavía si las dos propuestas representan con corrección la variación producida en el coeficiente de película, se puede afirmar que la ecuación de Woschni se debe ajustar necesariamente para reproducir el funcionamiento de un motor con hidrógeno.

## 4.2 Efecto combinado de las especies y distintas condiciones de presión y temperatura

### 4.2.1 Características del caso

Una vez definido el incremento que representa el cambio de combustible en el cálculo del coeficiente de película, se decide estudiar la variación que se produce cuando se combina con los datos de presión y temperatura provenientes de cada ensayo, es decir, en lugar de modificar en postratamiento las condiciones de funcionamiento, se emplean los datos pertenecientes a cada uno de ellos (condiciones de funcionamiento 1).

Para poder analizar este efecto, se utiliza el caso 2 (figura 4.4), el cual funciona a 1500 *rpm* y  $\lambda = 1$ , con la misma masa de aire atrapada.

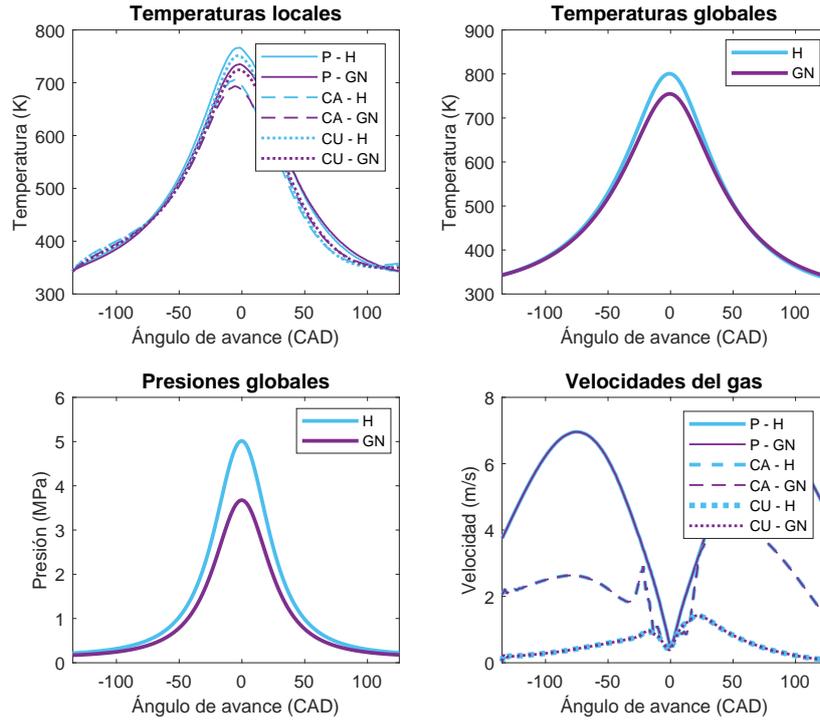


Figura 4.4: Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 2

Debido a que las condiciones a la apertura y al cierre de las válvulas se definen iguales, los valores de presión y temperatura en el primer y último tramo deben ser idénticos (aunque presenten variaciones cerca del PMS por usar mezclas de distintas características). Si además se considera que ambos ensayos trabajan con el mismo motor, y por tanto, el mismo pistón con el mismo movimiento, se obtienen con CFD los mismos valores de velocidad del gas en el ensayo de gas natural y de hidrógeno.

#### 4.2.2 Comparación del coeficiente de película

Para poder observar el cambio producido por la variación en los datos de presión y temperatura, se compara el coeficiente de película calculado por cada modelo en los ensayos de hidrógeno<sup>1</sup> de los casos 1 y 2. La razón de esta comparación es que la única diferencia existente entre ambos ensayos es un incremento promedio del 30 % en la presión y del 1,6 % en la temperatura.

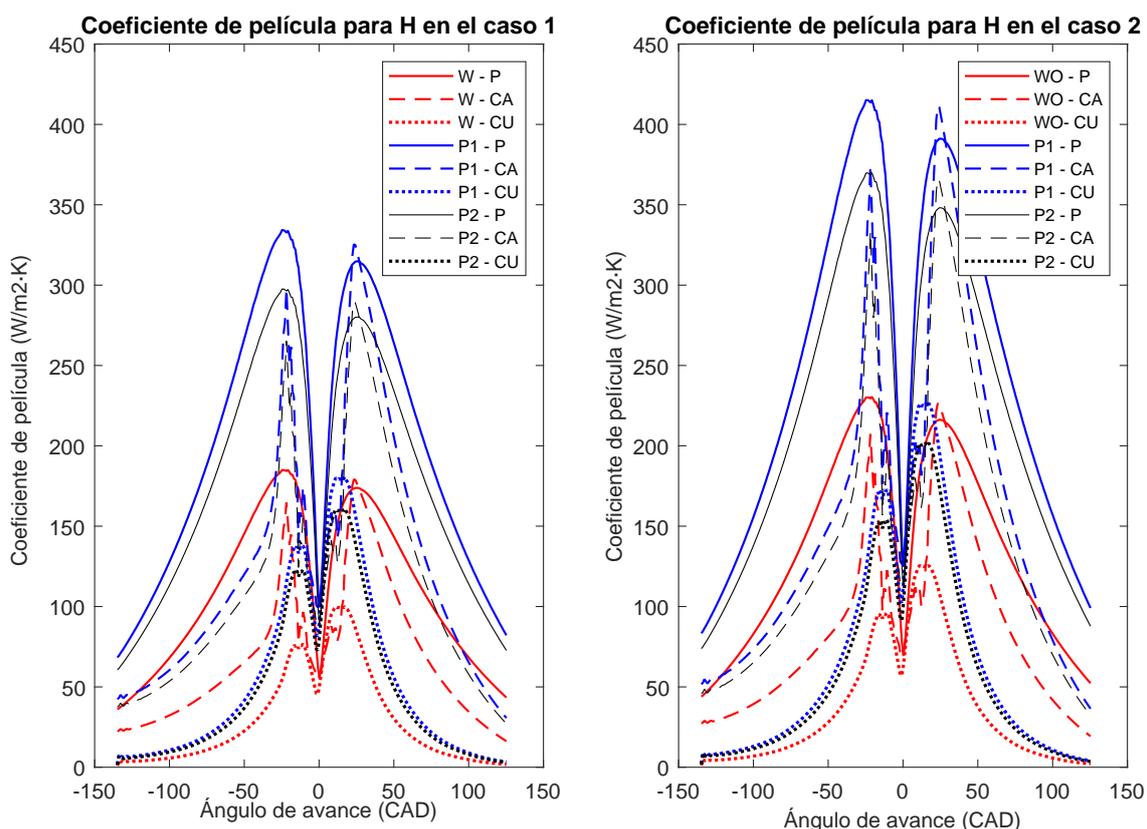
Si además de ver la evolución en la gráfica 4.5, se calculan los valores instantáneos de la  $h$  y se computa el incremento promedio porcentual que supone la variación de los datos de P y T considerando hidrógeno como combustible, se obtiene un valor cercano al 23 % para los tres modelos, como se explica en la tabla 4.4.

En definitiva, existe una relación directa entre los datos de presión y temperatura y el coeficiente de convección, como cabía esperar. Además, la variación producida en el coeficiente de película se dará de igual forma en cualquiera de los modelos propuestos.

<sup>1</sup>No se compara el posible incremento de la  $h$  en los ensayos de gas natural para los casos 1 y 2 porque los datos de entrada son los mismos en ambos.

**Tabla 4.4:** Incremento promedio del coeficiente de película en los casos 1 y 2

Ecuación	Incremento (%)
Woschni	23,00 %
Propuesta 1	22,96 %
Propuesta 2	22,98 %



**Figura 4.5:** Coeficiente de película local para el hidrógeno en los casos 1 y 2

### 4.2.3 Comparación de resultados con el caso 1

Si se comparan los resultados del coeficiente de película de los ensayos con hidrógeno para los casos 1 y 2 (cuya única diferencia son los valores de presión y temperatura), se puede observar en la tabla 4.5 que la variación radica fundamentalmente en la densidad. Para poder ver el efecto de todas las propiedades termo-físicas, se examinan los resultados obtenidos con la propuesta 2 para un ángulo de avance cualquiera ( $-23 CAD$ ), ya que se podrán extrapolar las conclusiones para cualquier punto.

Si además, se obtienen los datos de la densidad para ambos casos en ese punto (tabla 4.6), se puede ver como un aumento del 28 % en la densidad, provoca el incremento del 22 % en el término  $\rho^{0,8}$ .

**Tabla 4.5:** Diferencias entre el coeficiente de película para el hidrógeno de los casos 1 y 2

	<b>h</b>	=	<b>cte</b>	$\rho^{0,8}$	$v_g^{0,8}$	$D^{-0,2}$	$\mu^{-0,5}$	$c_p^{0,3}$	$k_g^{0,7}$
Ensayo 1	294,774	=	0,3895	5,240	2,821	1,649	175,630	8,900	0,199
Ensayo 2	363,932	=	0,3895	6,406	2,821	1,649	172,920	8,910	0,203
Incremento (%)	23,06	=	0	22,25	0	0	0	-1,63	2,44

**Tabla 4.6:** Diferencias entre la densidad para el hidrógeno en los casos 1 y 2

	<b>Densidad (<math>kg/m^3</math>)</b>
Ensayo 1	7,928
Ensayo 2	10,192
Incremento (%)	28,55

Por tanto, se puede concluir que la propiedad que mayor variación presenta ante cambios de P y T es la densidad. Esto es debido a que el resto de propiedades definidas, son prácticamente independientes a modificaciones en la presión y solo varían ante cambios en la temperatura. Al ser la densidad dependiente de ambos términos y ser la presión el que presenta mayor incremento, se ve más influenciada que el resto.

Este mismo análisis se ha realizado entre los casos 3 y 4, y 5 y 6, para comprobar si la modificación en el cálculo de la velocidad del gas implica cambios en las diferencias de  $h$  presentes para el hidrógeno y el gas natural. En los apartados 10.3 y 11.4 del anexo, se confirma que  $v_g$  cambia la forma de la curva pero no los valores de las propiedades termo-físicas ni los incrementos entre las  $h$  para distintos combustibles.

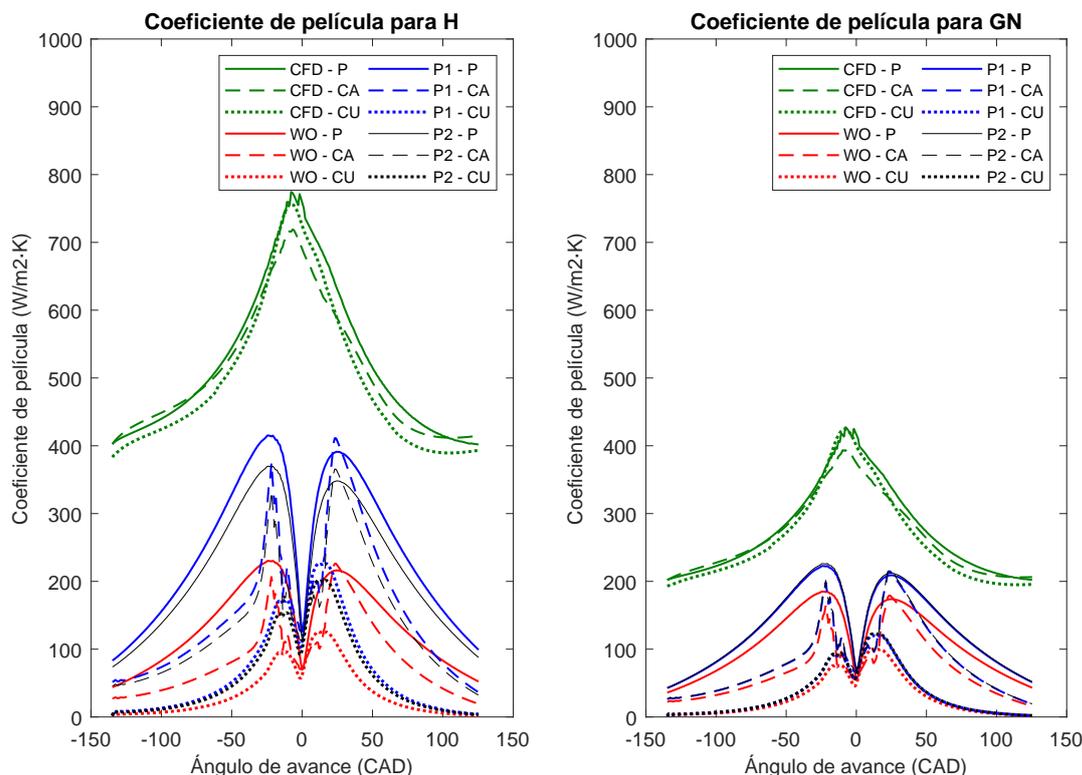
### 4.3 Efecto de la utilización de la velocidad local del gas proporcionada por CFD

#### 4.3.1 Características del caso

En este punto se quiere saber si es adecuada la utilización de la velocidad local del gas proporcionada por la herramienta de CFD en la ecuaciones de predicción que se han descrito en este documento, dado que el método de cálculo del programa informático y el de los modelos descritos es diferente.

Para ello, se va a utilizar el caso 2 (figura 4.4), ya que dispone de los datos de CFD del coeficiente de película, además de presentar las características de funcionamiento necesarias para realizar la comparación.

### 4.3.2 Comparación del coeficiente de película



**Figura 4.6:** Coeficiente de película local para el hidrógeno y el gas natural en el caso 2

Cuando se lleva a cabo un ensayo en arrastre, el aumento de la transmisión de calor se da exclusivamente por la compresión y expansión de la mezcla aire-combustible que produce el movimiento del pistón. Cuando el ciclo se encuentra en la etapa de compresión, el espacio en la cámara de combustión se reduce y el gas se ve afectado por ello, aumentando el movimiento de sus partículas y por tanto, incrementando la transferencia de calor entre ellas y las paredes del cilindro (y por ende, el coeficiente de película). Cuando entra la etapa de expansión, el gas tiene más espacio para moverse y la agitación de las partículas se reduce, disminuyendo así la transmisión de calor. Por esta razón se puede observar, en la figura 4.6, la tendencia descrita por CFD en ambas gráficas, la correspondiente al ensayo con hidrógeno y al ensayo con gas natural.

Como se puede apreciar en la misma imagen, esta forma no se representa con los modelos descritos en apartados anteriores debido al uso de la velocidad del gas local proporcionada por CFD. Si se comparan las figuras 4.4 y 4.6, se puede apreciar como las curvas del coeficiente de convección calculadas con los tres modelos comparados (Woschi y las propuestas 1 y 2) siguen la forma de la velocidad de la mezcla aire-combustible.

Los modelos descritos en los apartados 3.2, 3.3 y 3.4, son ecuaciones 0-D que emplean simplificaciones basadas en cálculos globales del sistema para obtener el valor del coeficiente de película, por lo que, cuando se utiliza uno de estos modelos con datos locales, la predicción que proporcionan es incorrecta. Por ello, en los siguientes apartados se explorará el uso de velocidades del gas globales descritas por las ecuaciones desarrolladas en el apartado 3.6.

## 4.4 Efecto de la utilización de la velocidad lineal media del pistón como velocidad del gas

### 4.4.1 Características del caso

Dadas las conclusiones obtenidas en el apartado anterior, se comienza el análisis del cálculo de la velocidad global del gas mediante ecuaciones y correlaciones. Aunque no sea realista, el primer paso en el estudio de  $v_g$  descarta un movimiento inicial del gas, por ser este caso de una complejidad mucho menor y proporcionar una primera aproximación que puede ayudar al entendimiento del problema.

En este apartado se utiliza el caso 4 (figura 4.7), el cual presenta las condiciones de funcionamiento 1 y la velocidad del gas calculada mediante la ecuación (3.36).

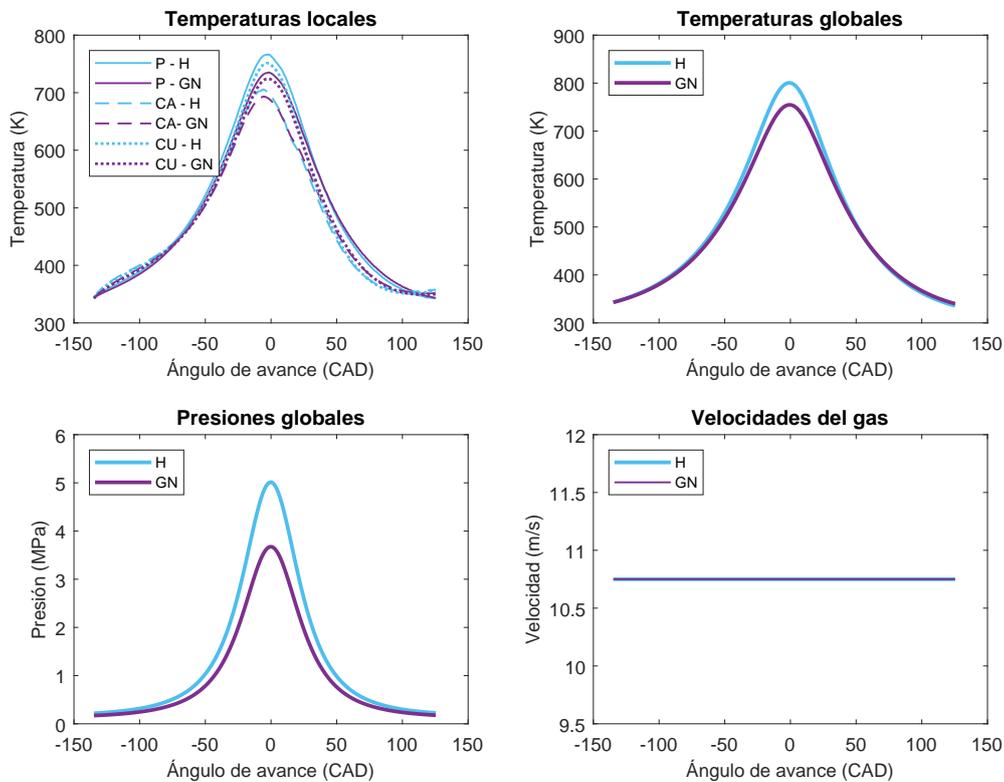
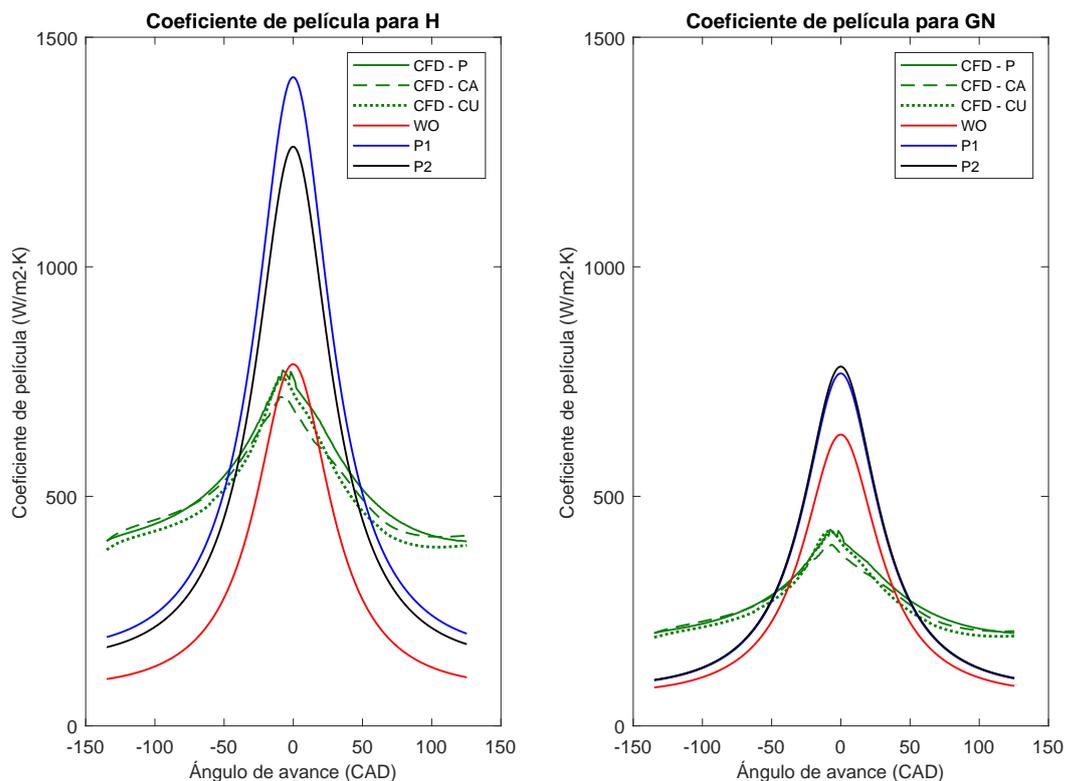


Figura 4.7: Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 4

Como se puede observar en la gráfica de la velocidad del gas, el valor es constante e igual para todas las zonas representadas, ya que se ha computado como la velocidad media lineal del pistón. Esto es resultado del uso de datos globales del cilindro en el cálculo, y por tanto, supondrá la obtención de un único coeficiente de película empleando los modelos de predicción.

#### 4.4.2 Comparación del coeficiente de película



**Figura 4.8:** Coeficiente de película medio para el hidrógeno y el gas natural en el caso 4

Como se puede comprobar en la figura 4.8, la forma de la curva del coeficiente de película ha cambiado, revelando una tendencia similar a la de CFD.

**Tabla 4.7:** Incremento del pico del coeficiente de película en el caso 4

Ecuación	Incremento de $h$ (%)
CFD	82,3 %
Woschni	25,44 %
Propuesta 1	86,35 %
Propuesta 2	63,24 %

Si se calculan los incrementos producidos en el término  $h$  en el punto de mayor transferencia de calor ( $0,23 \text{ CAD}$ ), se puede apreciar como la ecuación de Woschni subestima claramente la predicción del incremento del coeficiente de convección al cambiar de combustible, mientras que las propuestas muestran mayor similitud al CFD (tabla 4.7). Como ya se ha explicado anteriormente, el valor de incremento de CFD no se debe asumir preciso en términos absolutos, pero ambas propuestas representan con mayor precisión el comportamiento relativo de la evolución del coeficiente de película.

Si además se comparan los incrementos promedio en este caso con los obtenidos en el caso 2 (la única diferencia existente entre ambos es la forma de cálculo de  $v_g$ ), se aprecia como estos no varían (tabla 4.8). Es decir, la velocidad del gas afecta a la forma de la curva por igual se trate del combustible que se trate.

**Tabla 4.8:** Incremento promedio del coeficiente de película en el caso 4

Ecuación	Incremento de h caso 2 (%)	Incremento de h caso 4 (%)
Woschni	23,01 %	23,01 %
Propuesta 1	90,42 %	90,42 %
Propuesta 2	67,01 %	67,01 %

Como en este proyecto se pretenden definir tendencias y no obtener valores exactos, se puede considerar este ensayo como una primera aproximación aceptable al CFD. Sin embargo, como se comentaba en el apartado 2.2.1, el ensayo en arrastre se debe realizar en condiciones lo más similares posibles al funcionamiento normal de un motor y eso requiere un movimiento inicial de tumble. Por tanto, una vez obtenidas diversas conclusiones y observados los resultados presentados, se da un paso más en la complejidad del cálculo, añadiendo velocidad inicial al ensayo mediante otra simulación CFD.

# Estudio de la transferencia de calor en arrastre con Tumble

## 5.1 Efecto de la utilización de la ecuación de la velocidad con movimiento de tumble

### 5.1.1 Características del caso

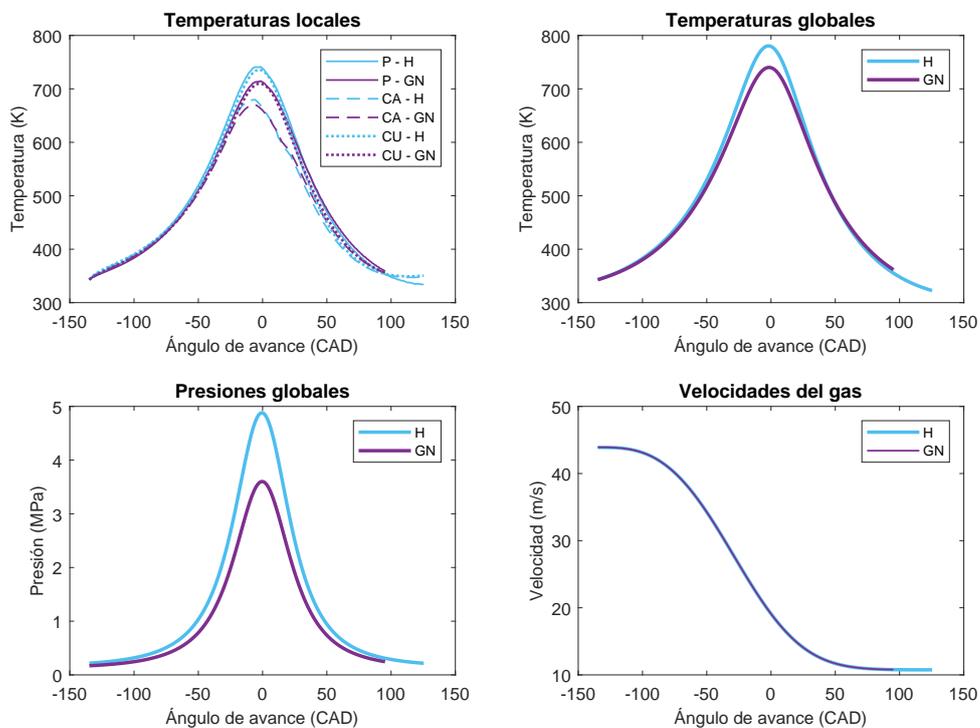
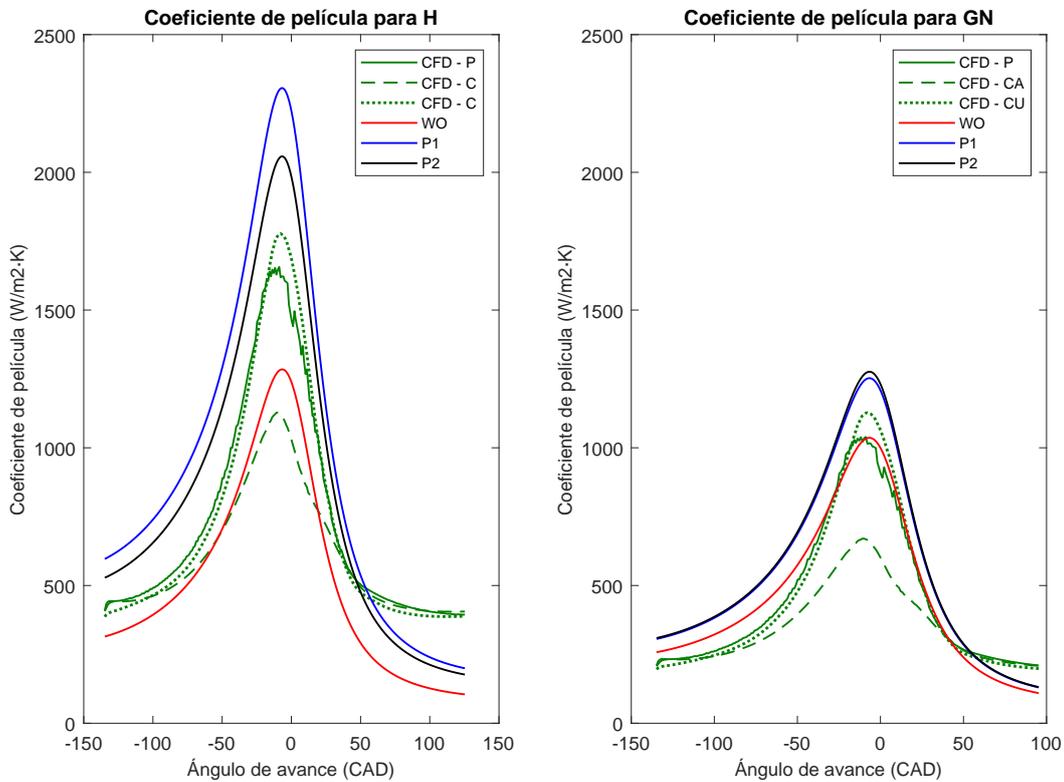


Figura 5.1: Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 6

En este capítulo, se pretende cuantificar el efecto del movimiento de tumble en la transferencia de calor. Para ello, se define en CFD un caso que presenta un movimiento inicial del gas obtenido de una simulación previa del proceso de llenado y vaciado del cilindro, además de otros datos que representarán las características del motor en funcionamiento habitual, y se ejecuta a 1500 rpm,  $\lambda = 1$  y la misma masa de aire atrapada para el combustible de hidrógeno y gas natural. El caso que recoge todos los requisitos presentados es el 6 (figura 5.1).

Para el cálculo de la velocidad del gas, se ha utilizado la ecuación (3.39), desarrollada en el apartado 3.6. Como se puede apreciar en la gráfica que representa esta magnitud, el valor ya no es constante, debido a que no solo tiene en cuenta la velocidad lineal media del pistón, si no que también estima el movimiento del gas durante todo el ciclo. En este caso el valor de la velocidad será global, por lo que se obtendrá un único valor de  $h$  para cada propuesta.

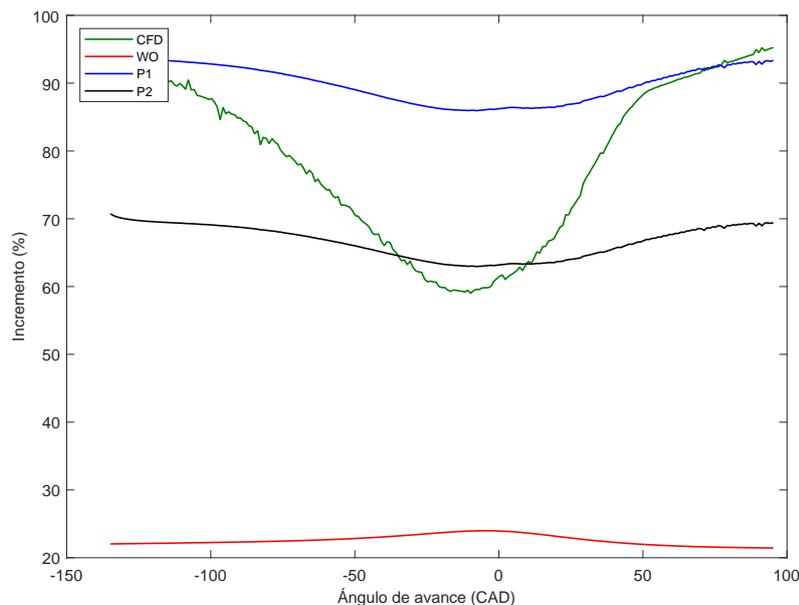
### 5.1.2 Comparación del coeficiente de película



**Figura 5.2:** Coeficiente de película medio para el hidrógeno y el gas natural en el caso 6

Siguiendo la línea de deducción de los casos 3 y 4, el cambio en el cálculo de la velocidad del gas, supone una curva de predicción del coeficiente de película por parte de los modelos más próxima a la realidad que utilizando los datos de CFD, como se puede observar en la figura 5.2.

Para cuantificar el incremento que supone el cambio de combustible en este ensayo, se decide graficar el resultado en lugar de calcularlo para un solo punto, con la intención de discernir con mayor precisión si las propuestas representan la diferencia entre gas natural e hidrógeno.



**Figura 5.3:** Incremento que supone el cambio de combustible en el caso 6

Como se puede apreciar en la figura 5.3, si se toma un valor medio aproximado del CFD (80% de incremento), se puede observar que ambas propuestas se diferencian en un 10% arriba o abajo de él, pero predicen el cambio. Sin embargo, la ecuación de Woschni, sigue predicendo los mismos resultados, es incapaz de representar la sustitución del combustible independientemente del tipo de caso realizado.

Si se estudia la gráfica por zonas, se puede apreciar que en los puntos de compresión y expansión, la propuesta 1 es la que más se asemeja a los valores de incremento de CFD, mientras que en la zona próxima al punto muerto superior, la propuesta 2 es la que proporciona los resultados más cercanos. La zona más interesante para conocer la transferencia de calor es la cercana al PMS, dado que será donde se alcancen mayores temperaturas (mayor transferencia de calor) y por tanto, donde se vayan a definir los valores límite para el diseño de las piezas.

### 5.1.3 Estudio de los números adimensionales

Para reafirmar las conclusiones obtenidas y conocer en mayor profundidad el funcionamiento de la transferencia de calor en el cilindro, se computan los tres números adimensionales descritos en el apartado 3.1 y se comprueba si las suposiciones que se han realizado durante el desarrollo de los modelos son correctas:

- En el modelo de Woschni y la Propuesta 1 se considera el número de Prandtl constante e igual a 0,7.
- La correlación de Dittus y Boelter, utilizada en la Propuesta 2, considera:
  - \* El número de Prandtl tiene que encontrarse en el intervalo [0,6 – 160].
  - \* El número de Reynolds debe ser mayor a 10000.

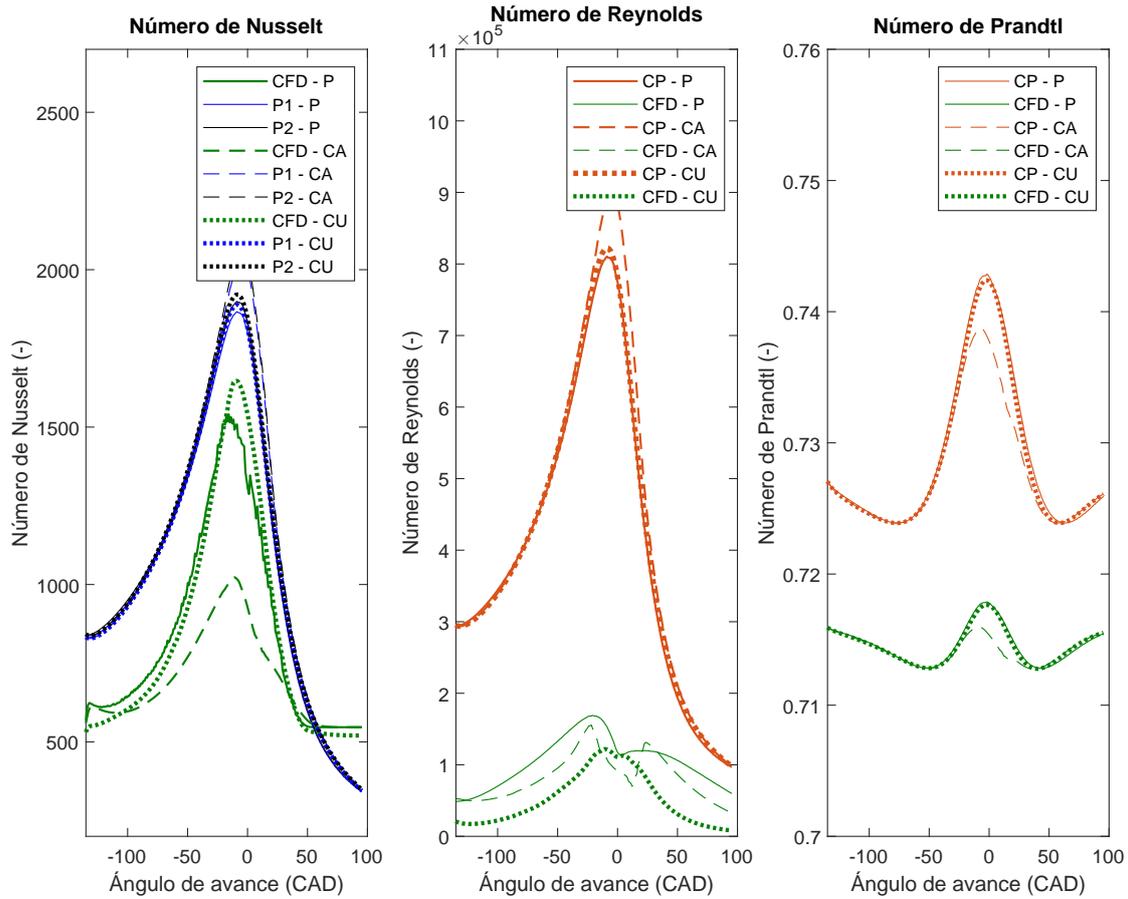


Figura 5.4: Números adimensionales del gas natural para el caso 6

En el caso del gas natural (figura 5.4) se llegan a los siguientes razonamientos:

- La diferencia presente en el número de Nusselt, se debe al coeficiente de película, dado que los datos de diámetro y conductancia son iguales para el cálculo de CFD y para el cálculo mediante modelos. Esto se debe a lo explicado en el apartado 3.5, por lo que no resta validez a los datos obtenidos y se considera un error imposible de cuantificar en el momento.
- En cuanto al número de Reynolds, las tendencias obtenidas mediante CFD y los modelos son completamente distintas debido a la utilización de valores diferentes de la velocidad del gas. Mientras que CFD está utilizando datos locales, los valores asignados a CP se han calculado con la velocidad obtenida mediante la ecuación (3.39). El resto de términos de los que depende el número de Reynolds, son iguales para los dos métodos de cálculo.
- El número de Prandtl, a pesar de tener una pequeña variación en su valor, se puede considerar constante y cercano a 0,7. Esta hipótesis fue realizada en su momento por Woschni y mediante los cálculos realizados se considera válida, ya que solo representa un error del 6% en el caso más alejado. Por esta razón, se puede observar a lo largo de todo el trabajo, la pequeña diferencia que presentan las propuestas 1 y 2 en el caso del gas natural, siendo la propuesta 2 de una complejidad innecesaria para los resultados obtenidos.

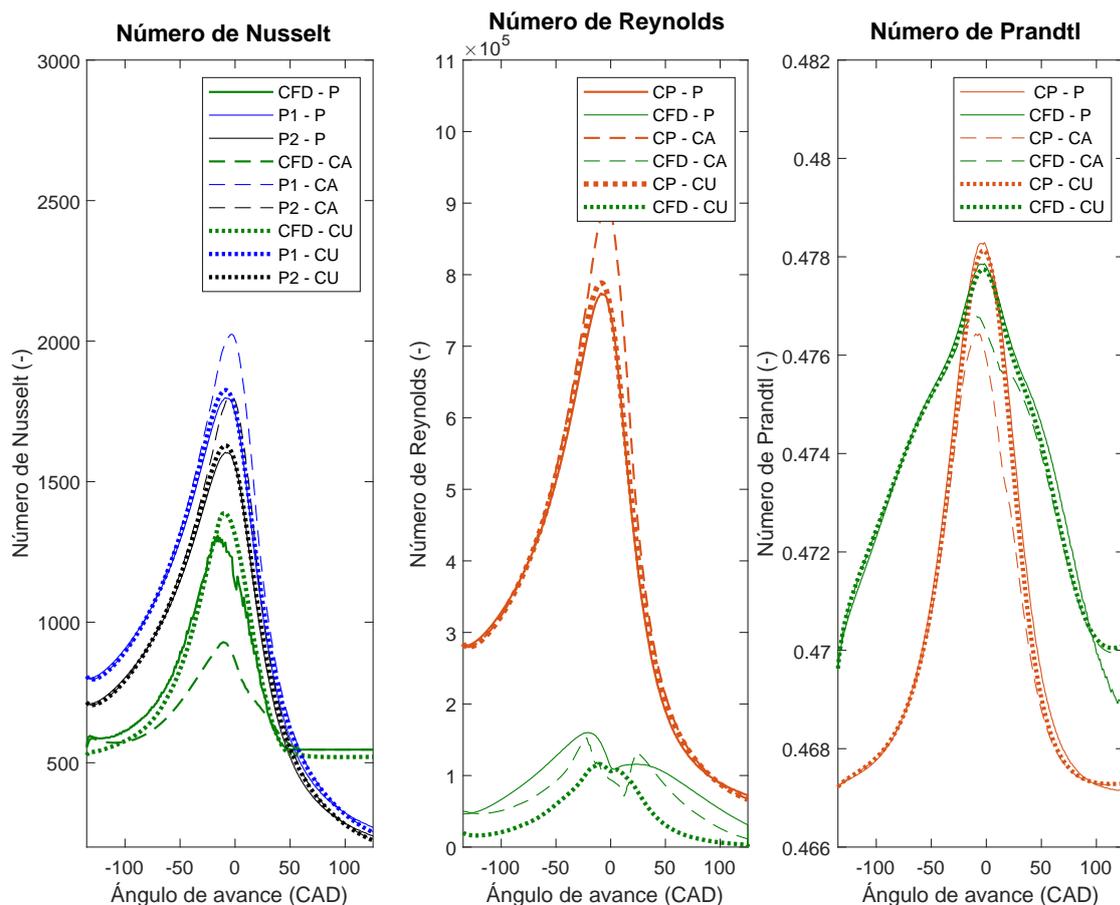


Figura 5.5: Números adimensionales del hidrógeno para el caso 6

El caso del hidrógeno (figura 5.5), aunque presenta similitudes con el gas natural, supone un cambio significativo: el número de Prandtl no coincide con la hipótesis de Woschni, es decir, esta no es extrapolable a combustibles que no contengan cadenas de carbono. Mientras que el autor describe un valor constante e igual a 0,7; en el caso del hidrógeno se obtienen valores que rondan el 0,47. Por esta razón, se observa la diferencia en el cálculo del coeficiente de película en las gráficas referentes al hidrógeno para las propuestas 1 y 2, siendo la segunda la que realiza un cálculo más riguroso, dado que la primera supone una hipótesis incorrecta.

Dicho esto, cabe remarcar que, trabajando con una mezcla formada por gas natural y aire, dos de las suposiciones que consideran Dittus y Boelter [13] en su artículo, no se cumplen. Mientras que el número de Prandtl se mantiene dentro del intervalo señalado, las suposiciones para el número de Reynolds y el ratio  $L/D$  no son correctas. Si definimos el ensayo en arrastre del motor funcionado con hidrógeno, las diferencias entre las suposiciones realizadas por los autores de la correlación y los resultados obtenidos son incluso mayores, ya que ninguno de los campos descritos se cumple. Aunque se es consciente de las contradicciones realizadas al hacer estas suposiciones, se decide no modificarlas por dos razones:

- La falta de correlaciones experimentales que represente el sistema descrito obliga a utilizar una ecuación que no está diseñada para ello.
- Pese a que la condición correspondiente a la relación L/D no se va a cumplir nunca en un motor, las hipótesis realizadas en cuanto a los números adimensionales se pueden llegar a cumplir cuando se realicen los ensayos en combustión. Este será un punto de estudio en pasos posteriores del proyecto.

## 5.2 Efecto del uso de una mezcla pobre

### 5.2.1 Características del caso

Finalmente, se quiere verificar si la tendencia del coeficiente de película cuando se modifica el dosado de la mezcla coincide con lo ya descrito en otros artículos científicos [6, 17].

Para poder observar este efecto, se deben comparar dos ensayos con las mismas condiciones de funcionamiento pero que presenten dosados distintos. Se ha decidido emplear los casos 6 y 7 (las condiciones de funcionamiento del caso 7 se describen en la figura 5.6), dado que su única diferencia es que el primero de ellos trabaja con una reacción estequiométrica, y el segundo establece un  $\lambda = 1,5$ .

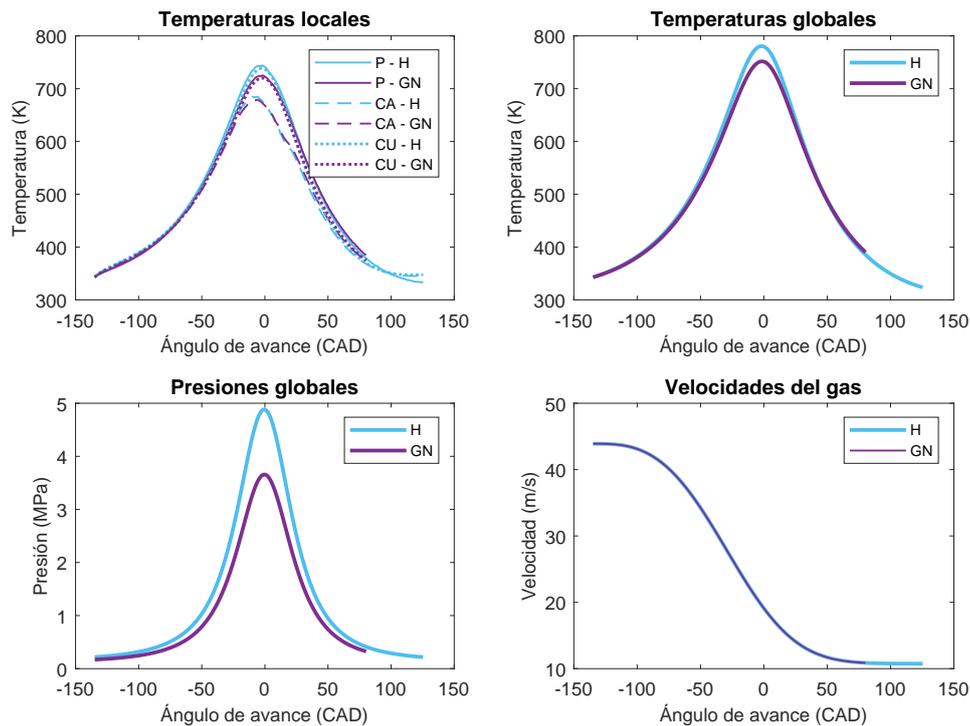


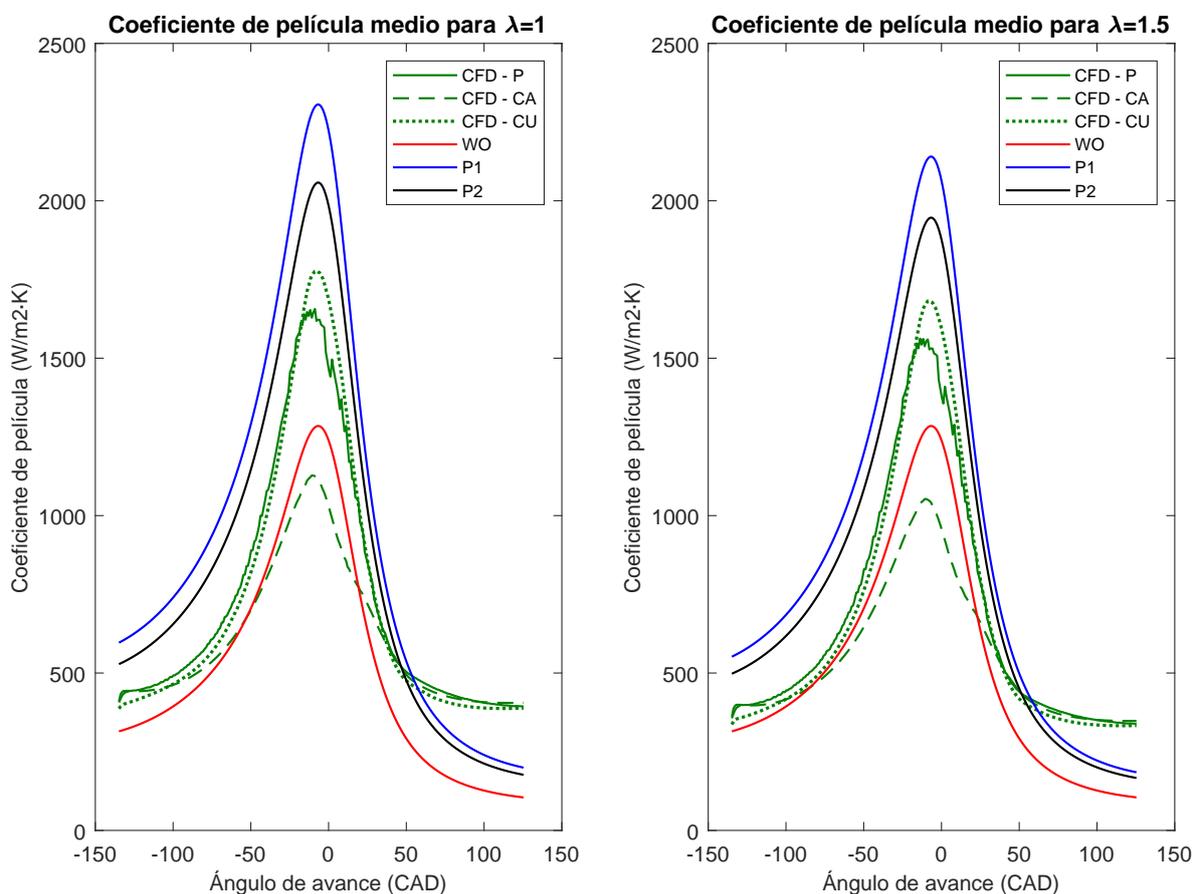
Figura 5.6: Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 7

### 5.2.2 Comparación del coeficiente de película y propiedades termo-físicas a diferente $\lambda$

Según Sierens y col. [17], el coeficiente de película del hidrógeno es mucho más sensible a cambios en el dosado relativo que el gas natural. En ensayos en combustión realizados por los autores, el coeficiente de convección del hidrógeno disminuía hasta en un 80% cuando se pasaba de  $\lambda = 1$  a  $\lambda = 2$ , produciéndose una caída del 23% en la potencia obtenida. Sin embargo, el gas natural apenas reaccionaba al cambio de dosado, manteniendo los resultados de  $h$  para  $\lambda = 2$  próximos a los valores para  $\lambda = 1$ .

#### Caso con hidrógeno como combustible

Cuando se analiza el ensayo realizado con hidrógeno en la figura 5.7, se aprecia una disminución del coeficiente de película en todos los modelos definidos (resultados de CFD y de las tres ecuaciones de predicción). Esto se produce por la reducción de la cantidad de hidrógeno que presenta la mezcla aire-combustible en comparación con el caso 6.



**Figura 5.7:** Coeficiente de película medio para los casos 6 y 7 del ensayo con hidrógeno

Para verificar lo descrito en teoría, se calcula el decremento que supone el cambio de dosado relativo en el punto de máxima transferencia de calor, es decir, el punto de mayor  $h$  ( $-6$  CAD).

**Tabla 5.1:** Decremento del pico del coeficiente de película entre los casos 6 y 7 de hidrógeno

Ecuación	Incremento de $h$ (%)
CFD	7,16 %
Woschni	0 %
Propuesta 1	7,73 %
Propuesta 2	5,73 %

Como se puede apreciar en la tabla 5.1 y en la gráfica 5.7, la disminución del coeficiente de película es mucho menor a la descrita en el artículo nombrado debido a que los datos descritos en él se obtuvieron mediante ensayos reales con combustión. Como en este documento se está trabajando con información proporcionada por simulaciones llevadas a cabo en arrastre, las disminuciones descritas en el coeficiente de convección no son tan pronunciadas pero sí, apreciables.

Si se define ahora, el coeficiente de película en el punto donde su valor es máximo término a término (tabla 5.2), se puede comprobar cual de las propiedades termo-físicas es más influyente en la disminución del valor y cuales son las variaciones más significativas entre propiedades al definir diferentes dosados.

**Tabla 5.2:** Diferencias entre el coeficiente de película de los casos 6 y 7 para el hidrógeno

	$h$	=	cte	$\rho^{0,8}$	$v_g^{0,8}$	$D^{-0,2}$	$\mu^{-0,5}$	$c_p^{0,3}$	$k_g^{0,7}$
Caso 6	2058,12	=	0,3895	8,743	11,390	1,649	166,586	8,949	0,216
Caso 7	1946,633	=	0,3895	9,426	11,390	1,649	166,183	8,715	0,195
Incremento (%)	-5,40	=	0	7,72	0	0	-0,44	-2,71	-9,96

A partir de la tabla 5.2 y de la figura 5.8, se pueden realizar diversos razonamientos:

- El término de la densidad es responsable de que el coeficiente de película no disminuya tanto en su valor, dado que es el único parámetro que crece con respecto al caso 6. Un aumento del 1,36 % en la densidad, provoca el incremento del 7,72 % en el coeficiente de película. Esto ocurre porque una mayor presencia de aire, supone un mayor peso molecular ( $PM_{aire} > PM_{H_2}$ ).
- La conductividad térmica se ve reducida en un 16 %, lo que equivale a una reducción del 9,96 % en el cálculo de la  $h$  entre un caso y otro, siendo el término más significativo.
- La viscosidad dinámica se mantiene prácticamente constante, es decir, no se ve afectada por el cambio de dosado a grandes rasgos (corroborando la hipótesis realizada por Woschni que estipula su única dependencia con la temperatura (3.16) y los resultados obtenidos en el apartado 4.1.2). Sin embargo, debido al pequeño cambio que se produce, su término disminuye en un 0,44 % en el cálculo de la  $h$  entre los casos 6 y 7.
- El calor específico a presión constante se reduce en un 9,2 % al pasar a una mezcla de  $\lambda = 1,5$ . Esto provoca una disminución de su término en el cálculo del coeficiente de película del 2,71 %.

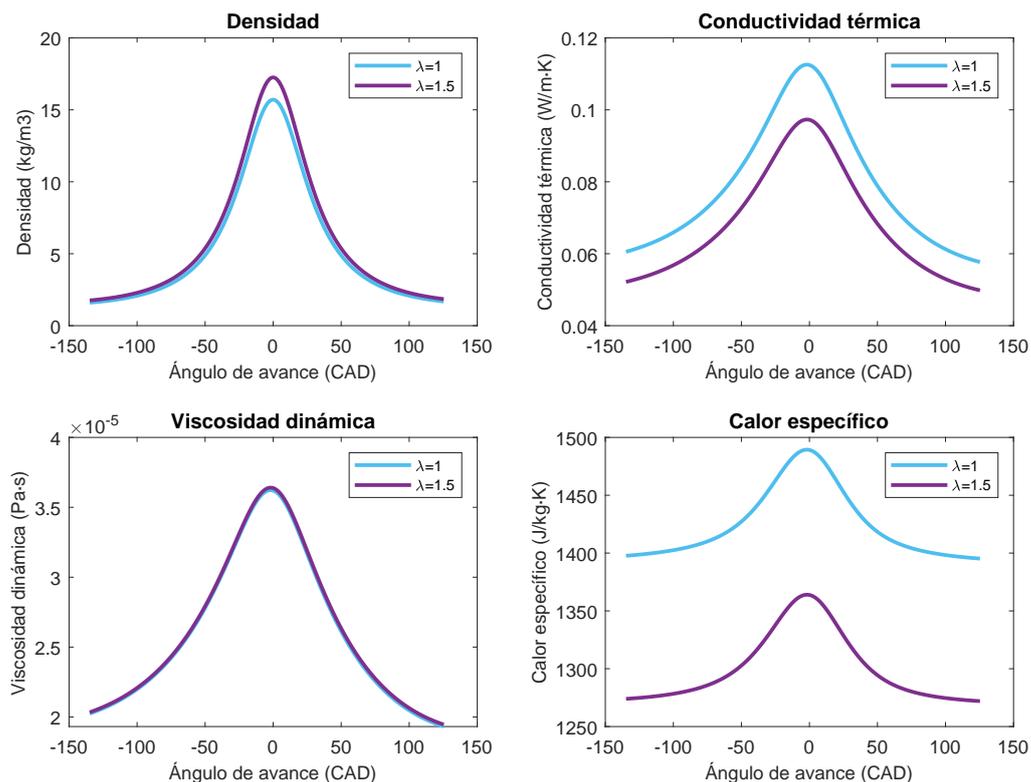


Figura 5.8: Propiedades termo-físicas para los casos 6 y 7 de hidrógeno

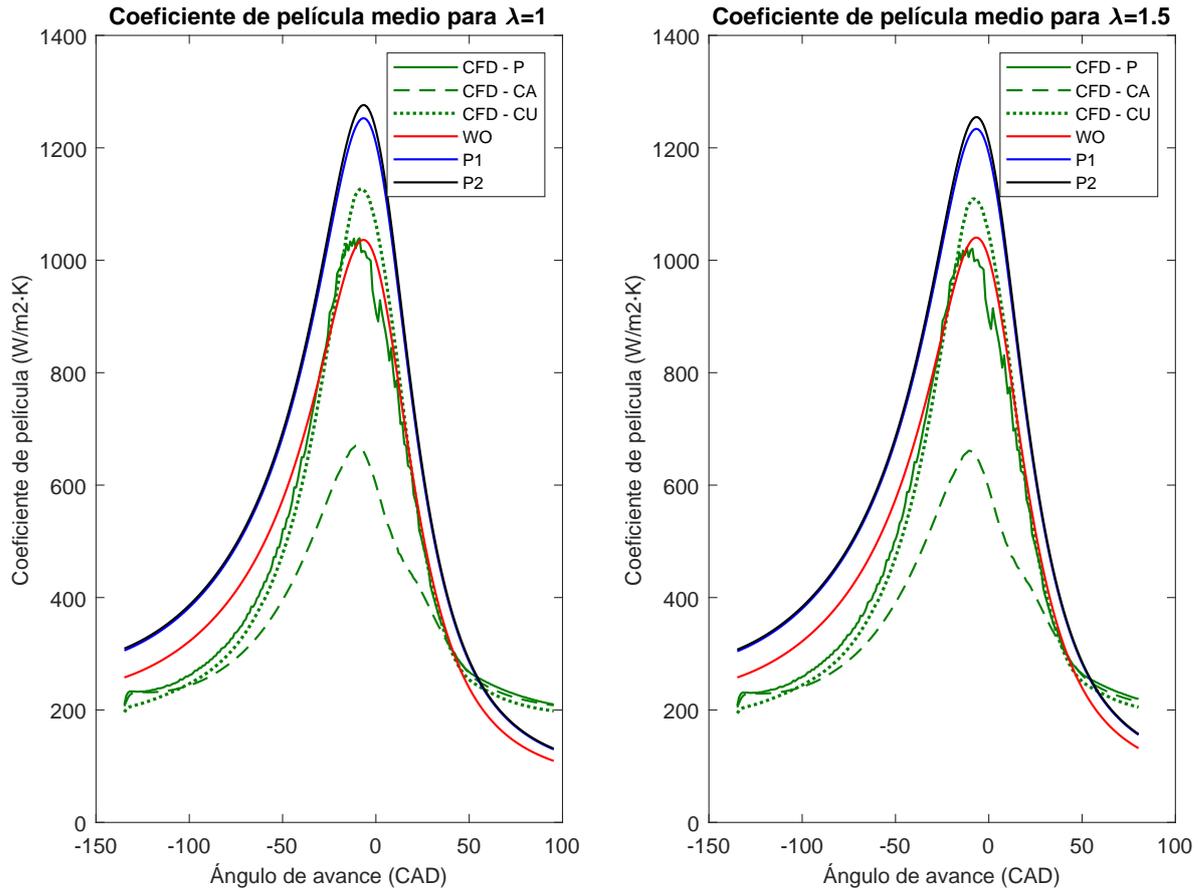
*Caso con gas natural como combustible*

Centrando la investigación en el ensayo con gas natural, se puede apreciar en la figura 5.9 como la diferencia existente en el hidrógeno, se ve reducida sustancialmente cuando se trata del carburante, verificando así, una vez más, la teoría.

Tabla 5.3: Decremento del pico del coeficiente de película entre los casos 6 y 7 de gas natural

Ecuación	Incremento de h (%)
CFD	1,62 %
Woschni	0 %
Propuesta 1	1,54 %
Propuesta 2	1,70 %

Al igual que en el ensayo de hidrógeno, se puede comprobar en la tabla 5.3 como la ecuación de Woschni falla al predecir el cambio en el coeficiente de película debido a variaciones en el dosado relativo. Aunque esta alteración en el valor de la  $h$  no sea de demasiada importancia para el gas natural, lo cierto es que la ecuación no es sensible ni a cambios en el tipo de combustible ni a la cantidad de él presente en la mezcla.



**Figura 5.9:** Decremento del coeficiente de película medio entre los casos 6 y 7 de gas natural

Realizando de nuevo el análisis término a término del coeficiente de convección entre los casos 6 y 7 pero para el ensayo de gas natural (tabla 5.4), se puede comprobar que la variación de las propiedades termo-físicas del gas natural cuando cambia la composición de la mezcla aire-combustible es mucho menor que para el hidrógeno.

**Tabla 5.4:** Diferencias entre el coeficiente de película de los casos 6 y 7 para el gas natural

	<b>h</b>	=	<b>cte</b>	$\rho^{0,8}$	$v_g^{0,8}$	$D^{-0,2}$	$\mu^{-0,5}$	$c_p^{0,3}$	$k_g^{0,7}$
Caso 6	1276,156	=	0,3895	8,949	11,389	1,649	169,998	8,467	0,135
Caso 7	1274,779	=	0,3895	9,048	11,389	1,649	168,589	8,379	0,134
Incremento (%)	-1,68	=	0	1,10	0	0	-0,84	-1,05	-0,9

Si se analizan la tabla 5.4 y la figura 5.10, se pueden obtener los siguientes razonamientos:

- La densidad apenas varía con el aumento de aire en la mezcla. Esto es porque el peso molecular del metano es mucho mayor al del hidrógeno, por lo que la variación que presenta el  $PM_{mezcla}$  en este caso es mucho menor. La densidad en el punto calculado aumenta en un 1,36%, lo que supone un incremento de la  $h$  del caso 6 al 7 del 1,1%.

- La conductividad térmica se reduce, como para el hidrógeno, pero en menor medida. Una disminución del 1,3% aproximadamente, supone un decremento en el coeficiente de película del 0,9%. Dado que la variación de la conductancia es tan pequeña con el dosado, la suposición de Woschni de ser únicamente dependiente de la temperatura (3.15), se podría considerar como correcta para el gas natural (pero no para el hidrógeno) por suponer un error casi imperceptible.
- La viscosidad dinámica apenas cambia, como en todos los casos mostrados a lo largo del documento, reafirmando una vez más la suposición descrita por Woschni (3.16) y que se considera también válida para cambios en el dosado de la mezcla. Una disminución del 1,65% supone un decremento en el cálculo de la  $h$  del 0,84%.
- El calor específico a presión constante es el único término cuya variación es apreciable con el cambio de dosado relativo. Dado el menor peso del metano en la mezcla, se produce una reducción en su valor cercana al 3,6%, lo que resulta en una disminución del coeficiente de convección del 1,05%.

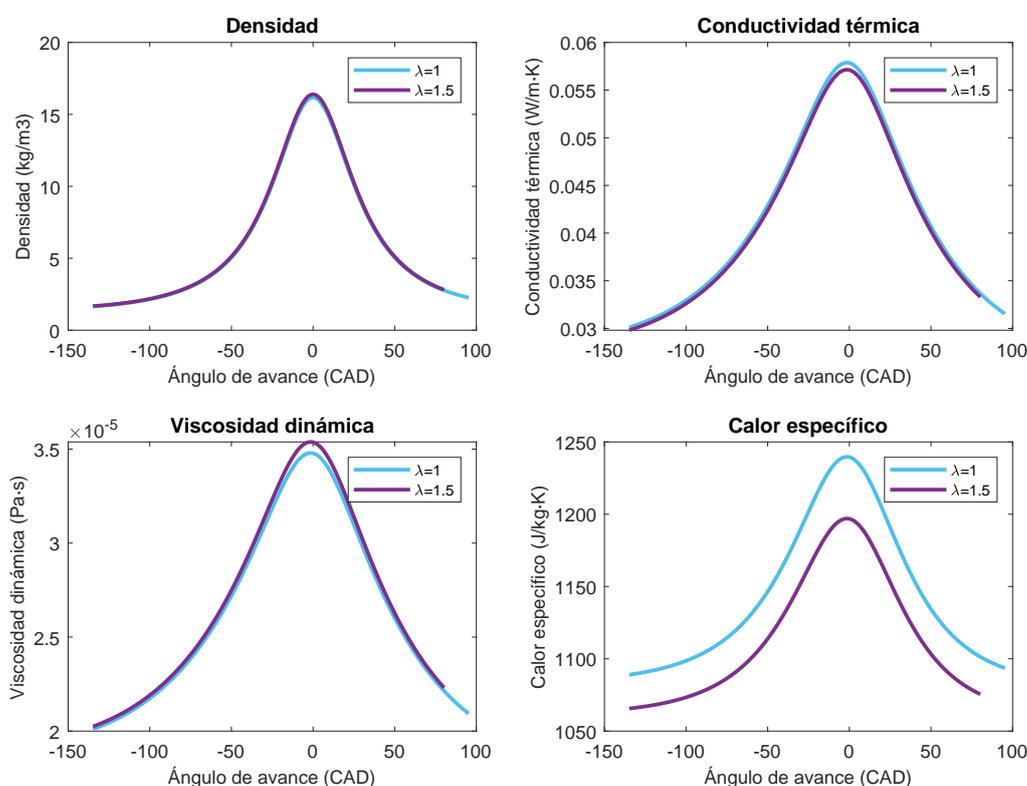


Figura 5.10: Propiedades termo-físicas para los casos 6 y 7 de gas natural

### 5.2.3 Comparación del coeficiente de película

Como cabía esperar en este caso, el incremento producido entre el coeficiente de película del gas natural y del hidrógeno (figura 5.11) es menor que en casos anteriores, debido al decremento que ha supuesto el cambio de dosado en su valor para el hidrógeno.

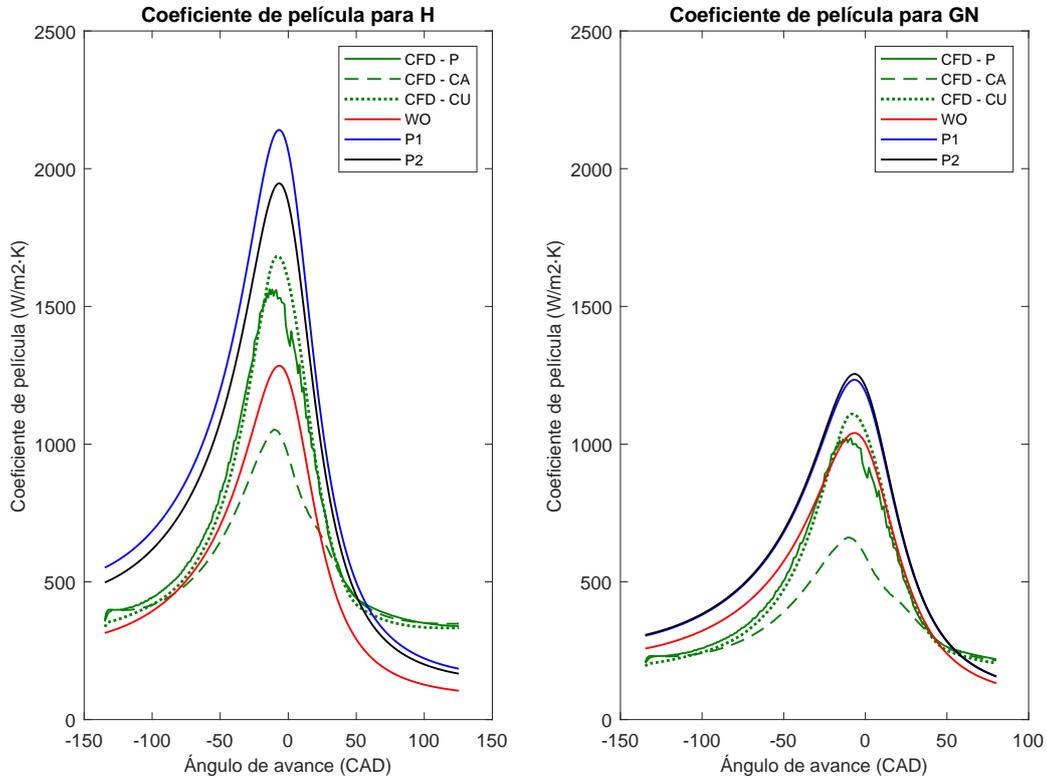


Figura 5.11: Coeficiente de película medio para el hidrógeno y el gas natural en el caso 7

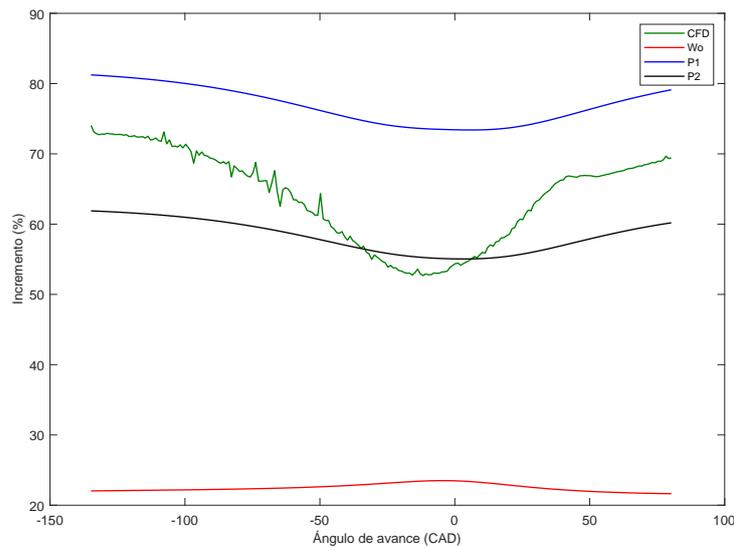


Figura 5.12: Incremento que supone el cambio de combustible en el caso 7

Como se puede observar en la figura 5.12 la variación que se produce en el valor de  $h$  cuando se cambia el combustible en un caso con mezcla pobre es menor. Si se compara con la gráfica correspondiente a la mezcla estequiométrica 5.3, se puede llegar a dos conclusiones:

- La variación en el dosado relativo de la mezcla aire-combustible no afecta a la forma de la curva de  $h$  y, por tanto, tampoco afecta a la evolución de los incrementos a lo largo del ciclo.
- Como el coeficiente de película del hidrógeno se ha visto reducido y el del gas natural se ha mantenido prácticamente constante, el incremento esperable entre combustibles disminuye. Mientras que para la mezcla estequiométrica los valores del CFD rondaban el 80 % de incremento, para la mezcla con  $\lambda = 1,5$  bajan al 70 % de incremento promedio. De la misma forma se ven afectadas las dos propuestas del documento, rondando la propuesta 1 el 80 % de incremento y la propuesta 2 el 60 % (en ambos casos sufriendo una disminución del 10 % aproximadamente con el caso 6). Sin embargo, como se ha comentado antes, el modelo de Woschni no aprecia modificaciones en el dosado relativo de la mezcla, por lo que el incremento observado se mantiene constante alrededor del 25 % para los casos 6 y 7.

# Conclusiones

### 6.1 Deducciones sobre la idoneidad de los modelos descritos

En este apartado se pretenden resumir las deducciones realizadas a cerca de los modelos de predicción descritos durante el proyecto y su fiabilidad en la representación de la transferencia de calor en MCÍAs funcionando con hidrógeno.

- El modelo de Woschni falla en la predicción del coeficiente de película cuando trata con combustibles diferentes a los fósiles y cuando el dosado relativo de la mezcla cambia. Dada la poca variación que presenta el coeficiente de convección del gas natural para distintos  $\lambda$ , se puede considerar aceptable el uso de la ecuación de Woschni aunque no prediga el cambio, pero no será aceptable en cálculos referentes al hidrógeno.
- La propuesta 1, aunque es capaz de representar los cambios en el coeficiente de convección cuando se modifica el combustible, realiza una suposición incorrecta para el hidrógeno, suponiendo un número de Prandtl constante e igual a 0,7 cuando su valor ronda el 0,4.
- La propuesta 2 es capaz de reproducir los cambios en el combustible y en el dosado relativo de la mezcla aire-combustible, además de ser correcta teóricamente. A pesar de ser de una complejidad mayor a la propuesta 1, se recomienda su uso para cálculos relacionados con el hidrógeno basándose en los datos obtenidos hasta el momento.

Dado que el proyecto deberá continuar por necesidad de realización de un mayor número de ensayos, las conclusiones realizadas pueden variar en futuros trabajos.

## 6.2 Conclusiones específicas

En este capítulo se pretenden remarcar las conclusiones más importantes a las que se han llegado en el desarrollo del documento:

- En las mismas condiciones de presión y temperatura:
  - \* El hidrógeno presenta una densidad menor al gas natural debido a la diferencia existente entre sus pesos moleculares, siendo el del hidrógeno ocho veces menor al del metano.
  - \* La hipótesis realizada por Woschni sobre la dependencia única de la viscosidad dinámica de los carburantes con la temperatura es extrapolable al hidrógeno, con errores menores al 1%. Sin embargo, la suposición para la conductividad térmica, no lo es (se deberá calcular la propiedad termo-física mediante su ecuación).
  - \* La diferencia observada entre los valores del calor específico para hidrógeno y gas natural reside en el cambio de la mezcla aire-combustible, es decir, en la diferencia presente en las propiedades intrínsecas del hidrógeno y del gas natural.
- Al comparar los ensayos de hidrógeno con las mismas composiciones pero diferentes valores de presiones y temperaturas, el incremento producido en el coeficiente de película es debido prácticamente en su totalidad a la variación de la densidad.
- La velocidad del gas empleada en las ecuaciones de predicción debe ser global, como la descrita por Woschni (y ajustada en el apartado 3.6), ya que los datos provenientes de CFD, además de no ser extrapolables a un ensayo en banco de pruebas real, suponen una modificación en la forma de la curva del coeficiente de película que no representa la tendencia esperada. Esto se debe a que los modelos presentados en el documento están simplificados y trabajan con datos globales, no locales.
- El método de cálculo de la velocidad del gas afecta a la forma de la curva del coeficiente de convección, pero no a las diferencias entre su valor para combustibles diferentes si presentan las mismas condiciones de funcionamiento.
- Un ensayo en arrastre en el que no se defina un movimiento inicial del gas, no aportará datos reales sobre el funcionamiento del motor. Se debe simular un ciclo de combustión previo al arrastre para introducir valores de temperaturas, presiones, movimiento del gas y cargas iniciales que proporcionen condiciones lo más cercanas al funcionamiento habitual del motor para que los resultados finales sean útiles.
- Pese a que las condiciones de utilización de la correlación experimental de Dittus y Boelter no se cumplen en su totalidad, se acepta el error por no conocer una alternativa que se adapte mejor a las características del cilindro de un MCIA.
- El hidrógeno es mucho más sensible a cambios en el dosado relativo que el gas natural en términos del coeficiente de película. Si se compara la mezcla estequiométrica con una mezcla pobre, la disminución en la  $h$  del hidrógeno será mucho más pronunciada que en el caso del gas natural. Esto se debe a la variabilidad de las propiedades termo-físicas de los combustibles con el dosado relativo.

- \* Las propiedades del hidrógeno se ven modificadas prácticamente en su totalidad, excepto por la viscosidad dinámica, la cual no presenta diferencias significativas para los dos casos (corroborando la hipótesis realizada por Woschni (3.16) y comprobada en el apartado 4.1.2).
- \* Las propiedades del gas natural no varían en gran medida ante el cambio en el dosado relativo, siendo el metano muy poco sensible a diferencias en la composición de la mezcla aire-combustible.
- El modelo de Woschni no representa cambios en el dosado relativo de la mezcla. Su utilización será incorrecta con combustibles que tengan variabilidad en sus propiedades debido a la composición de la mezcla pero se aceptará en combustibles que sean poco sensibles a este factor por presentar errores pequeños.

### 6.3 Aplicabilidad e impacto del proyecto

Como se ha explicado en los capítulos introductorios, la aplicabilidad de los modelos de transferencia de calor en el diseño de nuevos motores y mejora de los existentes es, además de extensa, necesaria.

Habiendo presentado los resultados obtenidos y explicadas sus consecuencias, se puede ver que, aun siendo este un proyecto inicial que se continuará desarrollando, las diferencias existentes en el cálculo de la transmisión de calor al cambiar las condiciones de funcionamiento, el dosado relativo de la mezcla aire-combustible y sobre todo, al modificar el combustible, son notorias y no se deben omitir.

Dado el corto tiempo disponible, este proyecto no se ha podido finalizar. Se necesita de la simulación de más escenarios para poder confirmar las conclusiones que se han ido obteniendo y comprobar que los comportamientos observados no son diferentes en otras situaciones. Para ello, además de los ensayos presentados, se deberán añadir otros, como por ejemplo:

- Otros ensayos con dosado pobre y con dosado rico, que muestren como evoluciona el coeficiente de película en distintos escenarios y así, confirmar las suposiciones realizadas o mostrar tendencias diferentes que deban ser analizadas.
- Ensayos de combustión con las condiciones de los casos 6 y 7, además de las descritas en el ítem anterior. El análisis hecho hasta el momento no tiene en cuenta el fenómeno de la combustión, por lo que, para obtener unos resultados aplicables al funcionamiento habitual, se debe cuantificar esta situación. En este apartado se deberá modificar la ecuación de la velocidad del gas, teniendo en cuenta el término que se había omitido y que corresponde a este fenómeno. Además, debido a la presencia del frente de llama, las composiciones de los gases cambiarán, transformándose en nuevas especies (los productos de la reacción), las cuales se deben considerar en el cálculo de las propiedades termo-físicas.

Una vez realizados estos experimentos y, si se cree necesario en el momento, otros que presenten características distintas, llegará el momento de las conclusiones definitivas y la definición de una ecuación que se aproxime lo más posible a las tendencias que se pretenden obtener. Para su validación, se realizarán ensayos reales y se implementará en la herramienta de cálculo de CALMEC, comprobando así que los resultados obtenidos sean útiles y fiables.



# Bibliografía

- [1] *Libro de la Energía en España*. Ministerio del Medio Ambiente. 2019 (vid. pág. 3).
- [2] *Enmienda 283 del Proyecto de informe Modificación del Reglamento (UE) 2018/841*. Unión Europea. 2022 (vid. pág. 5).
- [3] L.E. Hombach y col. “Economic and environmental assessment of current (2015) and future (2030) use of E-fuels in light-duty vehicles in Germany”. En: *Journal of Cleaner Production* 207 (2019), págs. 153-162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.261> (vid. pág. 6).
- [4] F. Payri y J.M. Desantes. *Motores de combustión interna alternativos*. Universidad Politécnica de Valencia, 2011 (vid. pág. 7).
- [5] G. Woschni. “Universally Applicable Equation for Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine”. En: *SAE paper* 76 (1967) (vid. págs. 10, 22).
- [6] J. Demuyne y col. “On the applicability of empirical heat transfer models for hydrogen combustion engines”. En: *International Journal of Hydrogen Energy* 36.1 (2011), págs. 975-984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.10.059> (vid. págs. 10, 47).
- [7] D. Verdú Torres. “Mejora de una herramienta de diagnóstico de la combustión a partir de la presión instantánea en cámara mediante la incorporación del modelo de Tumble”. Tesis de mtría. Escuela de Ingenieros Industriales, UPV, 2016-2017 (vid. pág. 11).
- [8] I.H. Bell y col. “Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp”. En: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 53.6 (2014), págs. 2498-2508. DOI: [10.1021/ie4033999](https://doi.org/10.1021/ie4033999) (vid. pág. 16).
- [9] F.P. Incropera. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, Inc., 2007 (vid. pág. 18).
- [10] J.B. Heywood. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, 1988 (vid. pág. 19).

- [11] K. Mollenhauer y H. Tschöke. *Handbook of Diesel Engines*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010 (vid. pág. 19).
- [12] V.P. Zhukov y M. Pätz. “On the thermal conductivity of gas mixtures containing hydrogen”. En: *Heat and Mass Transfer* 53 (2016), págs. 1-4. DOI: 10.1007/s00231-016-1952-9 (vid. pág. 24).
- [13] F.W. Dittus y L.M.K. Boelter. *Heat transfer in automobile radiators of the tubular type*. Vol. 12. 1985, págs. 3-22. DOI: 10.1016/0735-1933(85)90003-X (vid. págs. 25, 46).
- [14] P. Olmeda y col. “An adapted heat transfer model for engines with tumble motion”. En: *Applied Energy* 158 (2015), págs. 190-202. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.051 (vid. pág. 27).
- [15] J. Martín. “Aportación al diagnóstico de la combustión en motores Diesel de inyección directa”. Tesis doct. Departamento de máquinas y motores térmicos, UPV, 2007 (vid. pág. 28).
- [16] R. Carreño. “A comprehensive methodology to analyse the Global Energy Balance in Reciprocating Internal Combustion Engines”. Tesis doct. Departamento de máquinas y motores térmicos, UPV, 2016 (vid. pág. 28).
- [17] R. Sierens y col. “Heat Transfer Comparison between Methane and Hydrogen in a Spark Ignited Engine”. En: (2010) (vid. págs. 47, 48).



Parte II

# Presupuesto



## Capítulo 7

# Introducción

En esta segunda parte del documento, se va a comprobar la viabilidad económica del proyecto descrito mediante la identificación de los costes descompuestos y totales dados durante su desarrollo. Para ello, se van a diferenciar dos tipos: la mano de obra y la maquinaria empleada.

Para simplificar los códigos presentes en tablas posteriores, se han ligado diferentes siglas a los recursos descritos, las cuales se describen a continuación:

**Tabla 7.1:** Siglas referentes a los recursos del presupuesto

<b>Tipo de Coste</b>	<b>Sigla</b>
Mano de Obra	MO
Maquinaria	MQ

## Capítulo 8

# Cuadros de precios

### 8.1 Cuadro de Precios de Mano de Obra

Este apartado pretende describir los costes ocasionados por el personal responsable del proyecto. Se especifican las horas dedicadas por cada uno de ellos ya sea por realización del proyecto como por labores de consultoría.

Código	Descripción	Coste(€/h)	Cantidad(h)	Precio(€)
MO.1	Ingeniero Técnico	30	300	9000
MO.2	Ingeniero Superior	40	100	4000
MO.3	Ingeniero Responsable	50	60	3000
MO.4	Ingeniero área CFD	40	20	800
MO.5	Ingeniero área Transferencia de Calor	40	20	800
<b>Precio Total Mano de Obra</b>				<b>17600 €</b>

## 8.2 Cuadro de Precios de Maquinaria

En lo referente a la maquinaria empleada, dado que el trabajo ha sido meramente teórico y no ha supuesto ningún ensayo experimental, el coste relativo a este apartado está compuesto prácticamente en su totalidad por los gastos ocasionados por las licencias de *software*.

Para cuantificar estos gastos, se considerará el periodo de amortización, ya que el tiempo de uso de la licencia durante el proyecto será menor al que esta ofrece.

$$C_A = \left( \frac{C_{MQ} \cdot t_u}{t_{amort}} \right) \quad (8.1)$$

Código	Descripción	$C_{MQ}$ (€)	$t_{amort}$ (años)	$t_u$ (mes)	Precio(€)
MQ.1	Ordenador	750	4	6	93,75
MQ.2	Software CONVERGE	8815	1	6	4407,5
MQ.3	Software CoolProp	-	-	6	0
MQ.4	Software MATLAB	7000	1	6	3500
MQ.5	Paquete de Office	60,98	1	6	30,49
<b>Precio Total Maquinaria y Licencias de Uso</b>					<b>8031,74 €</b>

# Presupuesto

### 9.1 Presupuesto de Ejecución Material (PEM)

El presupuesto de ejecución material se define como el sumatorio de todos los costes parciales definidos anteriormente, es decir, es la suma del cuadro de costes de mano de obra y de maquinaria. Además, se le deben añadir los costes indirectos (CI), los cuales se definen como aquellos que afectan en el desarrollo del proyecto pero no son posibles de contemplar directa y exactamente. En los proyectos desarrollados por un organismo perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia, se estipulan unos CI del 21 %.

Descripción	Precio(€)
Presupuesto parcial de mano de obra	17600
Presupuesto parcial de maquinaria	8031,74
Presupuesto total parcial	25631,74
Costes indirectos (21 %)	5382,67
<b>Presupuesto de Ejecución Material</b>	<b>31014,41 €</b>

El Presupuesto de Ejecución Material del presente proyecto de investigación supone un total de **TREINTA Y UN MIL CATORCE EUROS CON CUARENTA Y UN CÉNTIMOS (31014,41 €)**

## 9.2 Presupuesto de Ejecución por Contrata

El presupuesto de ejecución por contrata se compone del sumatorio del PEM y el beneficio industrial.

El beneficio industrial se define como el porcentaje del PEM que le corresponde al empresario o contratista (en este caso y por analogía con otros proyectos del mismo talante, se define como el 20%).

Descripción	Precio(€)
Presupuesto de Ejecución Material	31014,41
Beneficio industrial (20%)	6202,88
<b>Presupuesto de Ejecución por Contrata</b>	<b>37217,29 €</b>

El Presupuesto de Ejecución por Contrata del presente proyecto de investigación supone un total de **TREINTA Y SIETE MIL DOSCIENTOS DIECISIETE EUROS CON VEINTINUEVE CÉNTIMOS (37217,29 €)**

### 9.3 Presupuesto Base de Licitación

Finalmente, el presupuesto base de licitación supone el añadido del IVA (21 %) al presupuesto de ejecución por contrata.

Descripción	Precio(€)
Presupuesto de Ejecución por Contrata	37217,29
IVA (21 %)	7815,63
<b>Presupuesto Base de Licitación</b>	<b>45032,92 €</b>

El Presupuesto Base de Licitación del presente proyecto de investigación supone un total de **CUARENTA Y CINCO MIL TREINTA Y DOS EUROS CON NOVENTA Y DOS CÉNTIMOS (45032,92 €)**



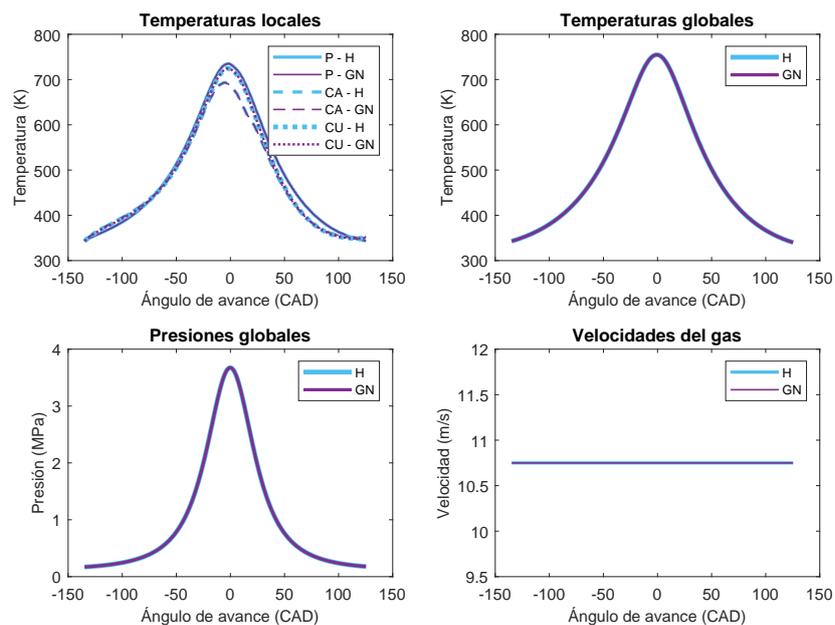
Parte III

Anexo de cálculo



# Descripción del caso 3

## 10.1 Características del caso



**Figura 10.1:** Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 3

El caso 3 (10.1) tiene:

- Los mismos valores de presión, temperatura y composiciones que el caso 1, es decir, trabaja en las condiciones de funcionamiento 2
- Los mismos valores de velocidad del gas que el caso 4, calculándolos mediante la ecuación (3.36). Esta fórmula proporciona valores de velocidad globales, por lo que el cálculo de  $h$  supondrá una única curva por propuesta.

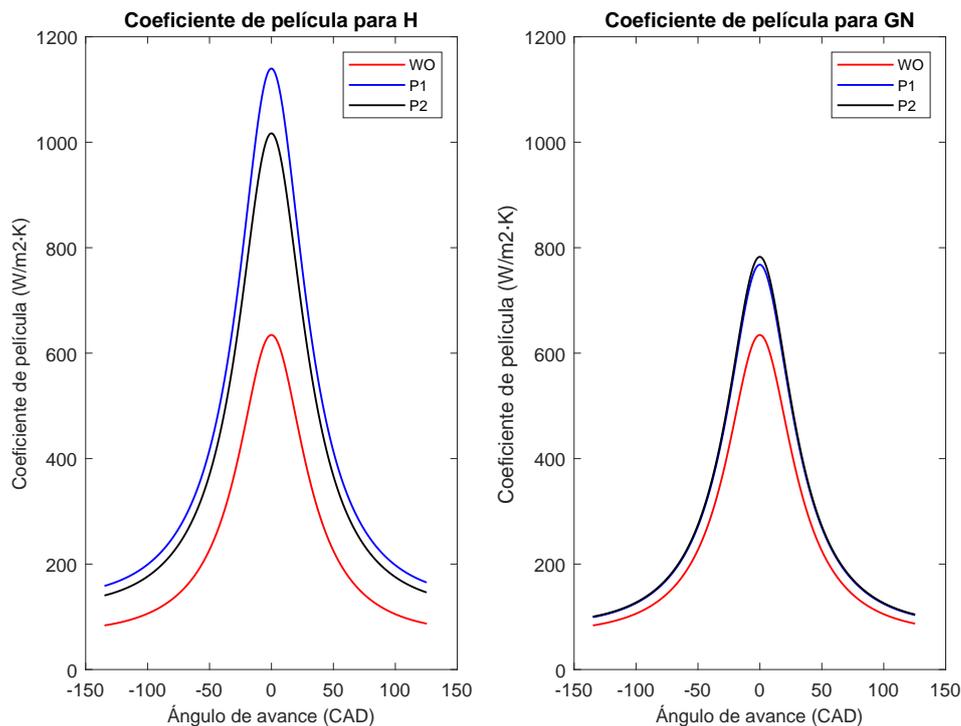
## 10.2 Comparación del coeficiente de película

Las propiedades termo-físicas de los casos 1 y 3 coinciden debido a que las condiciones de funcionamiento en las que trabajan (figuras 4.1 y 10.1) son idénticas excepto en la velocidad del gas (término del que son independientes). Esta es la razón por la que los incrementos promedio en el coeficiente de película por el cambio de combustible (mostrados en la tabla 10.1) son prácticamente idénticos a los del caso 1.

**Tabla 10.1:** Incrementos promedio del coeficiente de película en los casos 1 y 3

Ecuación	Incremento de $h$ caso 1 (%)	Incremento de $h$ caso 3 (%)
Woschni	0 %	0 %
Propuesta 1	54,89 %	54,75 %
Propuesta 2	35,83 %	35,70 %

Cabe comentar que el cambio en el cálculo de la velocidad, aunque no modifica las diferencias existentes entre los resultados para el hidrógeno y para el gas natural, dado que participa en todas las propuestas por igual (corroborando lo comentado en el apartado 4.4), modificará la forma de la curva del coeficiente de película.



**Figura 10.2:** Coeficiente de película medio para el hidrógeno y el gas natural en el ensayo 3

Al utilizar una velocidad constante y global en el cálculo, se puede observar en la figura 10.2 como la curva de  $h$  presenta la tendencia ascendente en la compresión (llegando a un pico cerca del PMS) y la caída en la expansión que se quería conseguir, diferenciándose de la curva incorrecta en forma de "M" que se veía los casos 1 y 2 (figuras 4.3 y 4.6).

Como se ha explicado en la memoria del proyecto, aunque estos datos indican que el estudio va en la dirección correcta, no son realistas por no considerar el movimiento inicial del gas. Por ello, es necesario el cálculo de los casos 5 y 6.

### 10.3 Efecto de distintas condiciones de presión y temperatura

Debido a la igualdad de las propiedades termo-físicas de los casos 1 y 3 y de los casos 2 y 4 (mismas condiciones de funcionamiento), es lógico que las diferencias del coeficiente de convección calculado entre ensayos análogos también lo sean (tabla 10.2).

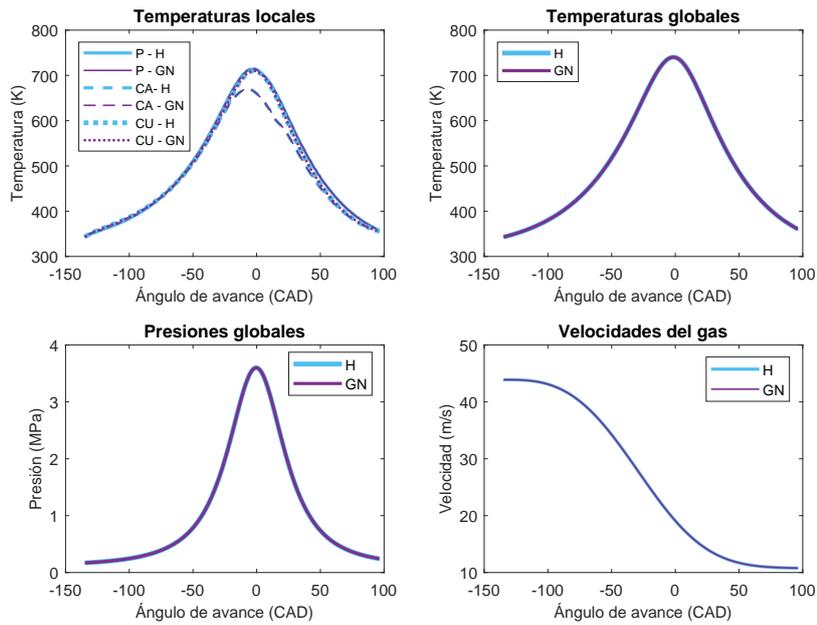
**Tabla 10.2:** Diferencias entre el coeficiente de película de los casos 3 y 4

	<b>h</b>	=	<b>cte</b>	$\rho^{0,8}$	$v_g^{0,8}$	$D^{-0,2}$	$\mu^{-0,5}$	$c_p^{0,3}$	$k_g^{0,7}$
Caso 3	698,364	=	0,3895	5,240	6,685	1,649	175,630	8,900	0,199
Caso 4	862,539	=	0,3895	6,406	6,685	1,649	172,920	8,910	0,203
Incremento (%)	23,06	=	0	22,25	0	0	0	-1,63	2.44

Se sigue observando que la densidad es el factor con mayor dependencia de la presión y temperatura en la determinación del coeficiente de convección.

# Descripción del caso 5

## 11.1 Características del caso



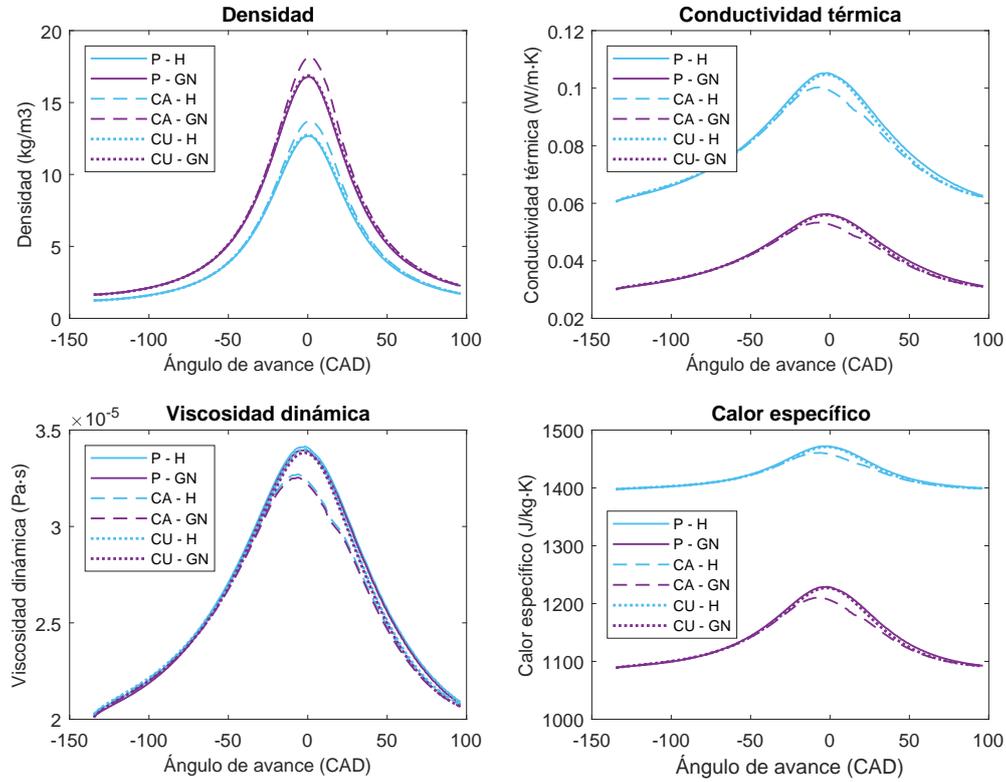
**Figura 11.1:** Presión, temperatura y velocidad del gas del caso 5

El caso 5 (figura 11.1) se basa en:

- Las condiciones de funcionamiento 2
- El cálculo de la velocidad del gas mediante la ecuación (3.39), por presentar movimiento del tipo tumble. Al obtener valores de velocidad globales para esta fórmula, el cálculo de la  $h$  resultará en una única curva por modelo.

## 11.2 Comparación de las propiedades termo-físicas

Como este caso presenta movimiento del tipo tumble, las curvas de presión, temperatura y velocidad del gas son diferentes a las presentadas para los casos 1 y 3, por lo que los valores de las propiedades termo-físicas mostrados en la figura 11.2 serán diferentes a los representados en la figura 4.2.



**Figura 11.2:** Propiedades termo-físicas para el hidrógeno y el gas natural en el caso 5

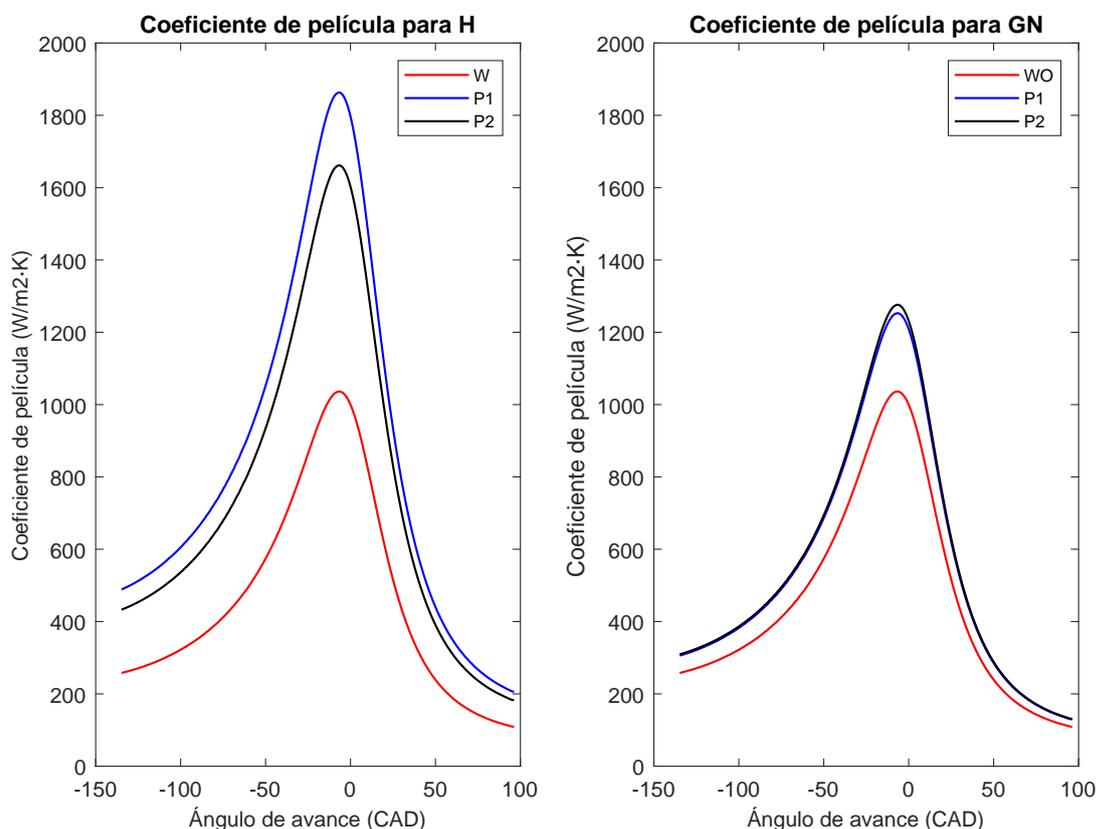
Sin embargo, al estar trabajando en las condiciones de funcionamiento 2 (mismos datos de P y T para los dos ensayos que componen el caso), las diferencias porcentuales entre las propiedades para el hidrógeno y el gas natural se mantendrán iguales a las obtenidas en los casos 1 y 3, lo cual se muestra en la tabla 11.1. Estas diferencias se han calculado para un ángulo de avance cualquiera ( $-23 \text{ CAD}$ ), debido a que los resultados son extrapolables para cualquier punto del ciclo.

**Tabla 11.1:** Incremento de las propiedades termo-físicas para los casos 1, 3 y 5

Incremento (%)	Caso 1	Caso 3	Caso 5
Densidad	32,41 %	32,41 %	32,41 %
Conductividad térmica	88,37 %	88,37 %	88,48 %
Viscosidad dinámica	0,50 %	0,50 %	0,50 %
Calor específico	20,85 %	20,85 %	20,96 %

### 11.3 Comparación del coeficiente de película

El coeficiente de convección mostrado en la figura 11.3 representa la forma esperada habiendo utilizado la ecuación simplificada de la velocidad. Estos datos, aunque corroboran que se debe utilizar la fórmula descrita, no aportan información real, ya que los valores de P y T del hidrógeno no pertenecen al propio ensayo.



**Figura 11.3:** Coeficiente de película medio para el hidrógeno y el gas natural en el caso 5

No obstante, se pueden utilizar los datos para verificar las conclusiones descritas en el apartado 10.2. Si se computan los incrementos promedio en este caso (tabla 11.2), se comprueba que sus valores son iguales a los obtenidos en los casos 1 y 3. Esto es debido a lo mostrado en la tabla 11.1, como los valores de P, T y  $v_g$  son idénticos para los dos ensayos que componen el caso, las diferencias en el coeficiente de convección son debidas a las propiedades termo-físicas, las cuales son solo dependientes del combustible si se definen las mismas condiciones de P y T.

**Tabla 11.2:** Incrementos promedio del coeficiente de película en el caso 5

Ecuación	Incremento de h caso 5 (%)
Woschni	0,12 %
Propuesta 1	54,38 %
Propuesta 2	36,49 %

## 11.4 Efecto de distintas condiciones de presión y temperatura

Si se calcula el incremento de las propiedades termo-físicas y el coeficiente de película entre los casos 5 y 6 (tabla 11.3), se puede observar que los resultados corroboran lo que ya se ha podido ver en los casos 1 y 2, y 3 y 4. El factor de mayor peso en el cálculo del coeficiente de convección cuando varían los datos de P y T es la densidad, necesitando un aumento de un 28 % para conseguir incrementar el valor de  $h$  en un 22 %.

**Tabla 11.3:** Diferencias entre el coeficiente de película de los ensayos 5 y 6

	<b>h</b>	=	<b>cte</b>	$\rho^{0,8}$	$v_g^{0,8}$	$D^{-0,2}$	$\mu^{-0,5}$	$c_p^{0,3}$	$k_g^{0,7}$
Ensayo 5	1416,714	=	0,3895	5,240	13,587	1,649	176,090	8,93	0,198
Ensayo 6	1748,547	=	0,3895	6,406	13,587	1,649	173,500	8,910	0,202
Incremento (%)	23,06	=	0	22,25	0	0	0	-1,5	2,31

Además, se puede afirmar que la forma de cálculo de la velocidad del gas no influye en las diferencias de las  $h$  para el hidrógeno y el gas natural, únicamente influye en la forma de la curva.