



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Análisis de dispositivos aumentadores de empuje en  
toberas de flujo pulsante

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Ribera Trencó, Alberto

Tutor/a: Morena Borja, Joaquín de la

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**Universitat Politècnica de València**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

**“ANÁLISIS DE DISPOSITIVOS  
AUMENTADORES DE EMPUJE EN  
TOBERAS DE FLUJO PULSANTE”**

Autor:

Alberto Ribera Trencó

Tutor:

Joaquín de la Morena Borja

- Julio 2023 -



## Resumen

Este documento se enfoca en el estudio y optimización de dispositivos aumentadores de empuje en toberas de flujo pulsante a través del uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) y su validación experimental.

En primer lugar, se realiza un estudio CFD en *Star-CCM+* de la tobera de un pulsorreactor real y parámetros de referencia extraídos de una búsqueda bibliográfica. Posteriormente, se lleva a cabo la optimización de la forma y parámetros de diseño del aumentador, utilizando las simulaciones CFD para evaluar y comparar diferentes diseños. Finalmente, se construye un modelo real del dispositivo y se lleva a cabo su validación experimental, donde se comparan los resultados obtenidos mediante la simulación CFD y los resultados experimentales.

En resumen, este trabajo tiene como propósito optimizar los dispositivos aumentadores de empuje en toberas de flujo pulsante mediante el uso de simulaciones CFD y su validación experimental, lo que puede tener importantes aplicaciones en la industria aeroespacial y la ingeniería de propulsión. Además, la metodología utilizada en este estudio puede ser aplicada en otros campos de la ingeniería para la optimización de diseños mediante simulaciones CFD y validación experimental.

**Palabras clave:** Empuje; pulsorreactor; optimización; CFD.



## **Abstract**

This document focuses on the study and optimization of thrust augmentation devices in pulsating flow nozzles using computational fluid dynamics (CFD) and experimental validation.

First, a CFD study is conducted in Star-CCM+ using a nozzle from a real pulsating reactor, and reference parameters extracted from a literature search. Subsequently, the shape and design parameters of the thrust augmenter are optimized using CFD simulations to evaluate and compare different designs. Finally, a real device model is constructed and experimentally validated, comparing the results obtained from the CFD simulation and experimental results.

In summary, the purpose of this work is to optimize thrust augmentation devices in pulsating flow nozzles using CFD simulations and experimental validation, which can have important applications in the aerospace industry and propulsion engineering. Additionally, the methodology used in this study can be applied in other fields of engineering for the optimization of designs using CFD simulations and experimental validation.

**Keywords:** Thrust; pulsejet; optimization; CFD.



## Resum

Aquest document es centra en l'estudi i optimització de dispositius augmentadors d'empenta en toveres de flux pulsant a través de l'ús de la dinàmica de fluids computacional (CFD, per les seues sigles en anglés) i la seua validació experimental.

En primer lloc, es realitza un estudi CFD en *Star-CCM+* d'una tovera d'un pulsoreactor real i paràmetres de referència extrets d'una cerca bibliogràfica. Posteriorment, es duu a terme l'optimització de la forma i paràmetres de disseny de l'augmentador, utilitzant les simulacions CFD per avaluar i comparar diferents dissenys. Finalment, es construeix un model real del dispositiu i es realitza la seua validació experimental, on es comparen els resultats obtinguts mitjançant la simulació CFD i els resultats experimentals.

En resum, aquest treball té com a propòsit optimitzar els dispositius augmentadors d'empenta en toveres de flux pulsant mitjançant l'ús de simulacions CFD i la seua validació experimental, la qual cosa pot tindre importants aplicacions en la indústria aeroespacial i l'enginyeria de propulsió. A més, la metodologia utilitzada en aquest estudi pot ser aplicada en altres camps de l'enginyeria per a l'optimització de dissenys mitjançant simulacions CFD i validació experimental.

**Paraules clau:** Espenta; pulsoreactor; optimització; CFD.



# Índice general

<b>I</b>	<b>Memoria</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>6</b>
1.1	Motivación del estudio . . . . .	6
1.2	Objetivos . . . . .	6
1.3	Estructura . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Descripción del pulsorreactor</b>	<b>8</b>
2.1	Principio de funcionamiento . . . . .	8
2.2	Tipos de pulsorreactores . . . . .	9
2.2.1	Pulsorreactor con válvulas . . . . .	9
2.2.2	Pulsorreactor sin válvulas . . . . .	10
2.3	Autoencendido en pulsorreactores . . . . .	11
2.4	Emisiones en pulsorreactores . . . . .	11
2.5	Aumentador de empuje . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Planteamiento del estudio</b>	<b>14</b>
3.1	Descripción del problema . . . . .	14
3.1.1	Condiciones iniciales . . . . .	14
3.2	Dimensionamiento . . . . .	15
3.3	Revisión de la literatura . . . . .	15
3.3.1	Empuje de referencia . . . . .	15
3.3.2	Duración del pulso . . . . .	16
3.3.3	Temperatura de salida . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Configuración del modelo</b>	<b>18</b>
4.1	Solver . . . . .	18
4.2	Geometría . . . . .	18
4.3	Modelos físicos . . . . .	19
4.3.1	Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) . . . . .	19
4.3.2	Modelo de turbulencia k-epsilon realizable . . . . .	20
4.3.3	Flujo segregado . . . . .	20
4.3.4	Salto de tiempo adaptativo . . . . .	20
4.3.5	Ecuación de la energía: flujo segregado (temperatura) . . . . .	22
4.4	Definición de condiciones de contorno . . . . .	22
4.5	Estrategia de mallado . . . . .	23
4.6	Monitores de variables de estudio . . . . .	24
4.7	Velocidad de salida . . . . .	25
4.7.1	Sensibilidad de malla: caso base (tobera primaria) . . . . .	26

<b>5</b>	<b>Análisis del caso base</b>	<b>29</b>
5.1	Aumentador . . . . .	29
5.2	Análisis de los resultados . . . . .	29
5.2.1	Flujo másico . . . . .	30
5.2.2	Perfil de velocidades . . . . .	32
5.2.3	Cálculo del empuje pico . . . . .	33
5.2.4	Cálculo de empuje medio . . . . .	33
5.3	Sensibilidad de malla . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Estudios de sensibilidad</b>	<b>37</b>
6.1	Variación de las condiciones de contorno . . . . .	37
6.1.1	Velocidad de salida . . . . .	37
6.1.2	Temperatura . . . . .	38
6.2	Variación de la geometría del aumentador . . . . .	40
6.2.1	Definición de parámetros geométricos . . . . .	40
6.2.2	Relación de expansión de la tobera secundaria ( $\pi_2$ ) . . . . .	41
6.2.3	Relación de áreas entre la entrada de la tobera secundaria y la salida de la tobera primaria ( $\beta$ ) . . . . .	42
6.2.4	Longitud adimensional de la ranura respecto a la tobera secundaria ( $\phi$ ) . . . . .	43
6.2.5	Relación de longitudes entre las toberas secundaria y primaria ( $\epsilon$ ) . . . . .	44
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>46</b>
7.1	Conclusiones . . . . .	46
7.2	Trabajo futuro . . . . .	47
7.3	Alineamiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) . . . . .	47
<b>II</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>51</b>
8.1	Costes del personal . . . . .	51
8.2	Costes de equipos y sistemas informáticos . . . . .	51
8.3	Coste total . . . . .	52
<b>III</b>	<b>Pliego de condiciones</b>	<b>53</b>
<b>9</b>	<b>Pliego de condiciones</b>	<b>54</b>
9.1	Normativa de trabajos de fin de grado de la UPV . . . . .	54
9.2	Reales Decretos . . . . .	55

# Nomenclatura

$\alpha$	Factor de empuje de tobera primaria respecto al total.
$\beta$	Relación de áreas entre la entrada de la tobera secundaria y la salida de la primaria.
$\dot{m}$	Flujo másico.
$\epsilon$	Ratio de disipación de energía cinética turbulenta.
$\epsilon$	Relación de longitudes entre la tobera secundaria y primaria.
$\phi$	Longitud adimensional de la ranura respecto a la tobera secundaria
$\pi_1$	Relación de expansión de la tobera primaria.
$\pi_2$	Relación de expansión de la tobera secundaria.
$\varphi$	Longitud adimensional de la ranura respecto a la tobera primaria.
<i>AMR</i>	Refinamiento de malla adaptativo.
<i>CFD</i>	Dinámica de fluidos computacional.
<i>CFL</i>	Número de Courant-Friedrichs-Levy.
<i>CO</i>	Monóxido de carbono.
<i>CO<sub>2</sub></i>	Dióxido de carbono.
<i>D<sub>EX1</sub></i>	Diámetro de salida de la tobera principal.
<i>D<sub>EX2</sub></i>	Longitud de la tobera secundaria.
<i>D<sub>IN1</sub></i>	Diámetro de entrada en la tobera principal.
<i>D<sub>IN2</sub></i>	Diámetro de entrada en la tobera secundaria.
<i>f<sub>i</sub></i>	Frecuencia de funcionamiento.
<i>FOD</i>	Daño por objetos extraños.
<i>H</i>	Altura del puerto.
<i>k</i>	Energía cinética turbulenta.
<i>L<sub>R2</sub></i>	Longitud de la ranura
<i>L<sub>ref</sub></i>	Longitud de referencia.
<i>L<sub>T1</sub></i>	Longitud de la tobera principal.

$L_{T_2}$  Longitud de la tobera secundaria.

$M_{out}$  Mach de salida.

$N_{ref}$  Empuje de referencia.

$NO_x$  Óxidos de nitrógeno.

*PISO* Implícito-presión con partición de operadores.

*RANS* Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds.

*SIMPLE* Método semi-implícito para ecuaciones relacionadas de presión.

$T_{inlet}$  Temperatura de salida en entrada a tobera primaria.

$t_p$  Duración del pulso.

$V_{inlet}$  Velocidad de salida en entrada a tobera primaria.

*VTOL* Aeronave de despegue y aterrizaje vertical.



Parte I

**Memoria**

# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo se detallan aspectos como la motivación y objetivos del estudio así como la estructura seguida durante la redacción de la presente memoria.

### 1.1 Motivación del estudio

El uso de pulsorreactores en aplicaciones aeronáuticas no ha resistido el paso del tiempo debido a varios grandes inconvenientes como su alto consumo, generación excesiva de ruido y dificultades en su control [1].

Pese a ello, ha sido reportado por fabricantes aficionados de este tipo de motores, que al añadir un segundo cono a cierta distancia de la salida de las toberas del motor el empuje generado por el dispositivo aumentaba significativamente, llegando a alcanzar incrementos de hasta el 40% [2]. Este fenómeno no se limita al mero testimonio anecdótico de entusiastas, sino que empresas aeronáuticas internacionales como *Boeing* mostraron su interés en esta forma de producir empuje con sistemas de tal simplicidad mecánica en vehículos de despegue y aterrizaje vertical (VTOL) de aplicación militar. Entre las ventajas que este sistema puede presentar se encuentran [3]:

- Resistencia a daño por objetos extraños (FOD), al no disponer de partes móviles.
- Pueden incluirse como parte estructural del vehículo, disminuyendo el peso estructural.
- Escalabilidad de la aplicación mediante conjuntos de motores, útiles para casos de alta sustentación.
- Rápida respuesta en aceleración.

Se vuelve pues de gran interés explorar el funcionamiento de estos sistemas a través de un estudio de mecánica de fluidos computacional (CFD).

### 1.2 Objetivos

Quedando justificados los motivos por los que este estudio debe realizarse, deben establecerse los objetivos que pretende abarcar. El principal objetivo de este trabajo consiste en comprobar mediante técnicas de mecánica de fluidos computacional el funcionamiento de dispositivos aumentadores de empuje en toberas de flujo pulsante, presentes en pulsorreactores.

Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes objetivos:

- Complementar la investigación teórica y experimental realizada por Théo Bour y Félix Coutand en *Theoretical and experimental investigation of the pulsejet engine* [4], añadiendo a su modelo numérico el funcionamiento de los aumentadores de empuje.
- Crear un modelo CFD capaz de simular con precisión y bajo coste computacional el funcionamiento de estos dispositivos de empuje.
- Dar explicación a los fenómenos físicos responsables del funcionamiento de los aumentadores de empuje a través de técnicas de mecánica de fluidos computacional.
- Evaluar la sensibilidad de la respuesta del dispositivo aumentador de empuje a sus principales parámetros de diseño.

### 1.3 Estructura

La estructura de esta memoria se puede dividir en varias partes diferenciadas.

En primer lugar, se realiza una introducción teórica a la tecnología estudiada. En ella, se explica el principio de funcionamiento de los pulsorreactores, sus tipos, y se introduce al lector en el uso de aumentadores de empuje para toberas de flujo pulsante.

Posteriormente, se detalla el planteamiento del estudio CFD, por el cual se establecen los valores de referencia que se emplearán en la simulación. Para ello, es necesario realizar tanto una búsqueda bibliográfica como estudios complementarios. Quedan así impuestos los valores físicos de las condiciones iniciales y de frontera de la simulación.

Es entonces cuando se expone el preproceso, fase por la cual se definen todos los aspectos relevantes del estudio previo a su ejecución. Estos son: la geometría del dominio fluido, la definición de las condiciones de contorno, la elección de los modelos físicos y el mallado. Finalmente, se describe el método por el cual se estima la velocidad de salida en la condición de entrada de flujo y se comprueba su validez mediante un estudio de sensibilidad de malla.

Se calcula pues un caso base con una geometría predefinida, donde se obtiene un valor preliminar de aumento de empuje. Con los resultados de esta simulación, se visualizan los fenómenos del flujo, y se obtienen datos de interés como el perfil de velocidades y contornos de temperatura. De nuevo se comprueba la validez del análisis a través de un estudio de sensibilidad análogo al anterior.

Finalmente, se realiza un estudio de sensibilidad por el cual se analiza la influencia de parámetros físicos y geométricos sobre el rendimiento de los dispositivos aumentadores. Tras esto, se obtienen las pautas de diseño óptimas para mejorar el funcionamiento de estos.



## Capítulo 2

# Descripción del pulsorreactor

Un pulsorreactor es un motor a reacción de combustión pulsante, es decir, la mezcla aire-combustible no se quema de forma continua como ocurre en los motores turbina de gas. En cambio, la combustión se produce de forma completa varias veces por segundo. La naturaleza de este principio de operación es similar al de los motores de combustión interna alternativos, pero obtienen el empuje mediante la expulsión de los gases quemados a gran velocidad como ocurre en los motores a reacción convencionales. En cierto sentido podrían considerarse como el eslabón intermedio entre estos dos tipos de propulsión [5].

Se trata de un motor muy simple. Consta de pocas o ninguna partes móviles, y no se requiere de maquinaria excesivamente compleja para su fabricación. Esta es una de sus principales ventajas, ya que como se ha visto en el anterior capítulo, su coste de fabricación extremadamente reducido les permitió ser fabricados en masa durante la II Guerra Mundial.

Estos motores están formados por una entrada de aire, una cámara de combustión y un escape acústicamente resonante [5].

### 2.1 Principio de funcionamiento

Previo a caracterizar completamente los detalles del funcionamiento de estas máquinas, se torna imprescindible introducir al lector en las nociones básicas de su forma de operación. Para ello, se explica cada uno de los procesos que se llevan a cabo dentro del motor durante un ciclo de operación [Figura 2.1]:

1. El aire fresco entra a la cámara de combustión a través de las aperturas del motor, debido a la depresión producida por la inercia de los gases en el ciclo previo. Es en este momento cuando se produce la mezcla del aire con el combustible. En el caso de un pulsorreactor sin válvulas, este suele inyectarse directamente en la cámara. Cierta cantidad de los gases del ciclo previo, aún quemándose, quedan atrapados en el escape, y son empujados de nuevo al interior del motor.
2. Se produce el autoencendido de la mezcla fresca, debido a la interacción con llamas residuales presentes en los gases quemados retornados a la cámara de combustión [6]. De nuevo se expulsan a gran velocidad por el escape, y la inercia de los gases provocan la depresión en la cámara que permite que se repita de nuevo el ciclo.

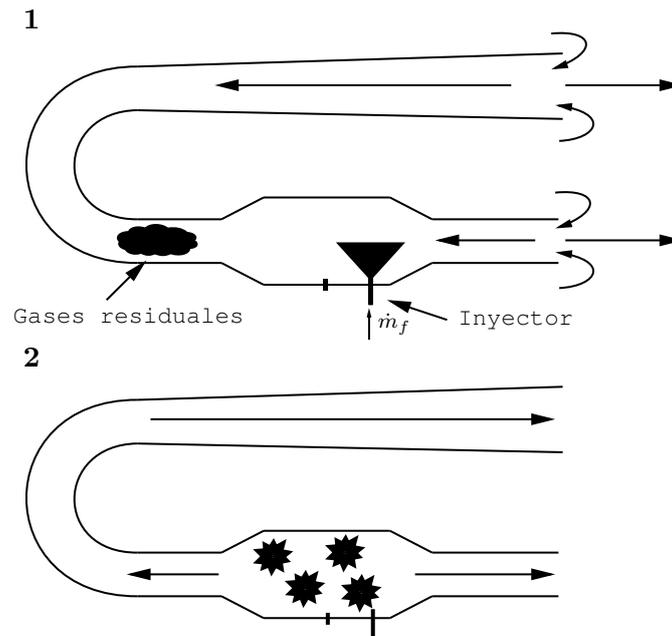


Figura 2.1: Diagrama de funcionamiento

Pese a que se requiere de encendido externo (bujía) para realizar el arranque del motor, una vez se alcanza la combustión autosostenida deja de ser necesario.

El principio de funcionamiento de los pulsorreactores con válvulas es similar, pero son estas válvulas aerodinámicas (o mecánicas) las que impiden que los gases quemados salgan por la entrada de aire.

A diferencia de otros motores a reacción sin partes móviles como los estatorreactores, los pulsorreactores son capaces de generar empuje en estático. Sin embargo, en los modelos con válvulas, cuando se alcanzan altas velocidades el efecto ariete del aire incidente impide el cierre completo de las válvulas aerodinámicas, limitando la velocidad máxima [1].

## 2.2 Tipos de pulsorreactores

Podemos distinguir principalmente de dos tipos de motores a reacción de combustión pulsante divididos por sus características constructivas.

### 2.2.1 Pulsorreactor con válvulas

Se distinguen por utilizar válvulas mecánicas o aerodinámicas situadas tras la entrada de aire del motor que impiden que la mezcla aire-combustible escape de la cámara de combustión una vez esta se inicia. Esto se consigue gracias a que la sobrepresión generada al producirse la deflagración empuja estas válvulas, forzando su cierre.



Figura 2.2: Válvulas mecánicas en un pulsorreactor de hobby [7]

Se ha observado que esta tipología de motor presenta un mayor empuje a igualdad de tamaño frente a los modelos sin válvulas [1], y esto puede explicar su mayor popularidad en pequeñas aplicaciones de aeromodelismo. Sin embargo, presentan una mayor complejidad mecánica y de fabricación, pues las pletinas que tienden a utilizarse por válvulas están sometidas a grandes esfuerzos de flexión repetitivos. Estas constituyen un gran punto de fallo en estos motores, limitando su vida útil a minutos u horas.

### 2.2.2 Pulsorreactor sin válvulas

En este tipo de motores, la geometría del motor actúa como válvula de no retorno. Una vez comienza la deflagración, el gas caliente atraviesa el tubo más corto casi de forma instantánea. Sin embargo, la mayor longitud del escape impide que este abandone por completo el motor.

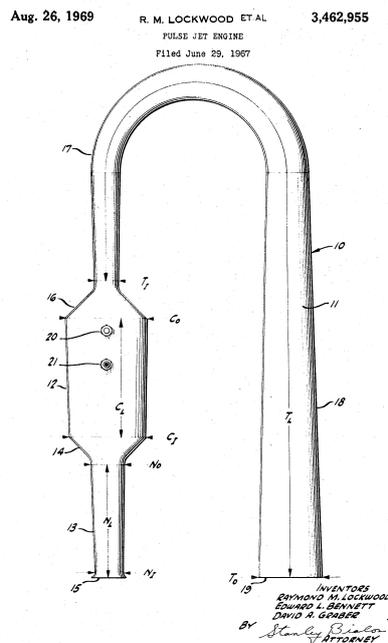


Figura 2.3: Diseño de pulsorreactor sin válvulas Lockwood-Hiller [8]

Este tipo de pulsorreactor presenta grandes ventajas debido a su simplicidad mecánica y ha sido objeto de estudio y mejora durante el último siglo. Algunos modelos presentan formas curvas como la patente representada en la Figura 2.3, mientras que otros utilizan ángulos y longitudes de tobera determinados para impedir el retorno de aire en dirección axial opuesta a la dirección del flujo de empuje.

No dispone de partes móviles. Se trata del dispositivo de propulsión a reacción más simple que existe [9]. Mantiene todas las ventajas de los modelos con válvulas pero eliminando el inconveniente de la vida útil de estas.

## 2.3 Autoencendido en pulsorreactores

Como se ha indicado durante la descripción del ciclo de funcionamiento de un pulsorreactor, la bujía de encendido sólo es utilizada durante el arranque del motor, ya que posteriormente la combustión se autosostiene.

En la Figura 2.4, extraída de *Visualization of Valved Pulsejet Combustors and Evidence of Compression Ignition* [6], se observa como la mezcla de aire y combustible entra en la cámara de combustión (en este caso, de un pulsorreactor con válvulas) en las subfiguras a y b. Posteriormente, entre las capturas c y d se produce el encendido de la mezcla fresca por el contacto de los gases residuales.

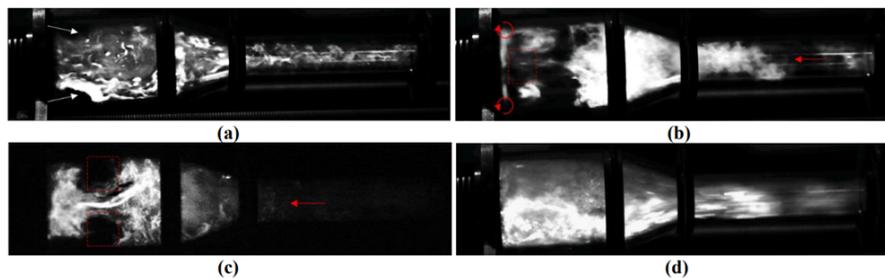


Figura 2.4: Secuencia del autoencendido en un pulsorreactor con válvulas [6]

## 2.4 Emisiones en pulsorreactores

La naturaleza de la combustión y funcionamiento de los pulsorreactores provocan que mencionar un breve análisis de sus diferentes tipos de emisiones sea de interés como introducción al estudio.

### Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ )

Los óxidos de nitrógeno constituyen una de las emisiones contaminantes y de efecto invernadero de mayor importancia en la actualidad, y se encuentra directamente ligada a los procesos de combustión a altas temperaturas, como los que ocurren en el interior de motores de combustión interna alternativos o, en este caso, pulsorreactores.

La temperatura a la que se produce el proceso de oxidación es el parámetro de referencia en la generación de estos compuestos. En los pulsorreactores, la presencia de gases quemados del ciclo anterior durante el encendido de la mezcla fresca constituye una suerte de sistema de

recirculación de gases de escape natural, que permite reducir la temperatura máxima alcanzada durante el ciclo.

Asimismo, estos factores junto al corto tiempo de residencia de los gases en la cámara de combustión provocan que se generen hasta tres veces menos cantidad de óxidos de nitrógeno que en cámaras de combustión convencionales [10].

### Monóxido de carbono ( $CO$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ )

De nuevo, las emisiones de  $CO$  son sustancialmente inferiores que las presentes en una cámara de combustión convencional. Sin embargo, estas aumentan según se incrementa la temperatura de funcionamiento. Asimismo, no existe un *trade-off* con los óxidos de nitrógeno [10].

Respecto al dióxido de carbono, su ratio de emisión está directamente relacionado con el consumo de combustible del motor. Mejorando la eficiencia de estos motores a reacción, como por ejemplo mediante el uso de aumentadores de empuje, se pueden reducir las emisiones de  $CO_2$  por unidad de empuje generada.

### Partículas, humos y hollín

Dado que la combustión presente en estos motores es premezclada, la generación de estas emisiones es prácticamente despreciable. El dosado pobre, justificado en las anteriores secciones por la presencia de gases residuales en la cámara, dificulta asimismo su formación. Pese a ello, en altos regímenes de funcionamiento sí se producen [10].

## 2.5 Aumentador de empuje

Un aumentador de empuje consiste en una tobera situada a una cierta distancia del escape del motor, que utiliza la depresión formada por los gases salientes a alta velocidad para succionar aire fresco dentro de la misma.

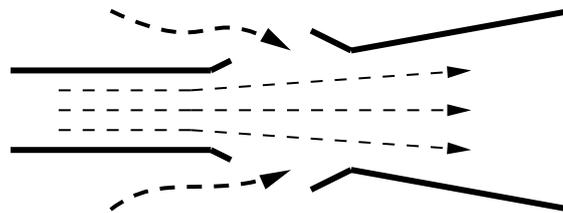


Figura 2.5: Diagrama de funcionamiento de un aumentador de empuje

Esta idea fue explorada en motores a reacción de flujo continuo, pero no reportó gran beneficio y sólo es utilizada en ciertas aplicaciones marginales. Sin embargo, se ha comprobado experimentalmente que este dispositivo es capaz de prácticamente doblar el empuje de un pulsorreactor Lockwood [11].

La razón por la que este invento resulta tan apropiado para un pulsorreactor puede encontrarse en que los flujos pulsantes tienden a formar estructuras toroidales [6], por lo que la forma

del flujo contribuye a arrastrar el aire circundante durante el transitorio, empujando a su vez el aire fresco que encuentra aguas abajo. Asimismo, el aumentador utiliza el calor residual del sistema expandiendo el gas saliente, aumentando significativamente el empuje [11].

Sin embargo, este sistema presenta una desventaja notable. Su gran volumen genera peso y resistencia aerodinámica, y a ciertas velocidades esta supera el beneficio de empuje obtenido.



# Capítulo 3

## Planteamiento del estudio

### 3.1 Descripción del problema

Se propone estudiar el escape de un pulsorreactor sin válvulas Lockwood-Hiller equipado con un dispositivo aumentador de empuje. Este se realizará bajo condiciones estáticas.

En este caso, se estudiará la tobera principal tal y como se muestra en la Figura 2.1. Esta quedará fijada durante el estudio, y viene definida por los siguientes parámetros geométricos:

- $D_{IN_1}$ : Diámetro de entrada en la tobera principal.
- $D_{EX_1}$ : Diámetro de salida de la tobera principal.
- $L_{T_1}$ : Longitud de la tobera principal.

Durante el desarrollo del caso CFD, se varían un total de cuatro parámetros de diseño de estos dispositivos para encontrar el óptimo. Estos son:

- $D_{IN_2}$ : Diámetro de entrada en la tobera secundaria.
- $D_{EX_2}$ : Diámetro de salida de la tobera secundaria.
- $L_{T_2}$ : Longitud de la tobera secundaria.
- $L_{R_2}$ : Longitud de la ranura.

Con el propósito de validar teóricamente la influencia de estos dispositivos en el empuje de toberas pulsantes, se toma como variable de respuesta la variación de empuje pico producido respecto al caso base sin aumentador. Para ello, se evaluará en cada caso el valor de flujo másico en la salida de la tobera secundaria, y combinándolo con la velocidad media de salida se obtiene el valor del empuje instantáneo mediante [5.2]:

#### 3.1.1 Condiciones iniciales

Para obtener una solución representativa del fenómeno de estudio es necesario introducir en el código CFD las condiciones iniciales del flujo a la salida de la tobera primaria. La obtención de sus valores se describe en detalle en la Sección 3.3. Estos son:

- Velocidad de salida,  $V_{inlet}$  [ $m/s$ ].
- Temperatura de salida,  $T_{inlet}$  [ $K$ ].

- Empuje de referencia,  $N_{ref}$  [N].
- Mach de salida,  $M_{out}$  [-], para comprobar si el escape del pulsorreactor se encuentra en bloqueo sónico.
- Duración del pulso,  $t_p$  [s], obtenida a partir de la frecuencia de funcionamiento.

## 3.2 Dimensionamiento

Decidir las dimensiones del motor a estudiar constituye el primer paso del estudio. Para ello, se ha tenido en cuenta por una parte la plausibilidad de su construcción, evitando modelos excesivamente grandes o pequeños, su facilidad para el ensayo y finalmente la disponibilidad de datos fiables en la literatura sobre su rendimiento.

Se ha elegido para este estudio el pulsorreactor de 55 libras diseñado por Bruce Simpson [2], por su viable fabricación y a la existencia de datos fiables de sus prestaciones. Se analizará únicamente el escape del pulsorreactor, cuyas dimensiones se detallan en la Figura 3.1.

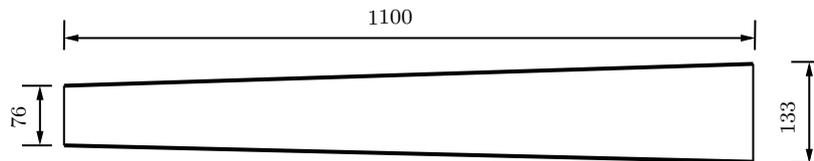


Figura 3.1: Medidas de la tobera de escape (en milímetros).

Con el propósito de reducir el coste computacional de las simulaciones, se establece un plano de simetría coincidente con el eje central de la tobera, por lo que únicamente se computará la mitad del modelo. En línea con este mismo objetivo, el dominio de estudio es bidimensional, asumiendo simetría cilíndrica. Esto, aparte de ofrecer ventajas sobre el rendimiento, también permite una más fácil manipulación y visualización de la malla. Por otro lado, introduce la necesidad de emplear correcciones tridimensionales en ciertas variables de estudio como el flujo másico, detalladas posteriormente.

Por otra parte, el dominio rectangular de la simulación abarcará una distancia de 1,5 metros aguas abajo desde la salida de la tobera principal, y 1 metro de altura respecto al eje de simetría. Se establece este tamaño de la región del flujo con el fin de permitir que las estructuras del mismo se desarrollen libremente, pero manteniendo un dominio pequeño con el fin de reducir el coste computacional.

## 3.3 Revisión de la literatura

Con el fin de encontrar datos realistas que nos permitan aproximar las condiciones de contorno de los gases de escape es necesario realizar una búsqueda bibliográfica.

### 3.3.1 Empuje de referencia

Saber el empuje del pulsorreactor a estudiar es un primer paso fundamental para estimar los datos necesarios para el estudio. De nuevo, de Simpson [2] obtenemos una tabla con los datos experimentales de empuje de este motor, los cuales también han sido tomados equipándolo con

aumentadores de empuje.

Pulsorreactor Hiller	25,0 [kg]
Pulsorreactor Hiller aumentado	35,5 [kg]

Cuadro 3.1: Tabla de empuje [2].

Tomaremos pues como empuje de referencia  $N_T = 25 \text{ kg}$ . Este dato debe ser escalado al empuje que proporciona la tobera de escape en el motor, ya que el tubo de admisión también expulsa gases durante la fase de expansión. Este ratio, el cual denominaremos  $\alpha$ , resulta ser del  $\alpha = 0,6 [-]$  [2]. Esto nos deja con un empuje de referencia  $N_{ref} = 15 \text{ kg}$ .

### 3.3.2 Duración del pulso

La duración del pulso marca el tiempo característico del problema. Este se obtiene a partir de la frecuencia de funcionamiento del pulsorreactor estudiado. Encontramos en [1] que una frecuencia habitual de funcionamiento de un pulsorreactor puede variar entre 250 pulsos por segundo para aplicaciones de pequeño tamaño hasta 45 en motores como el empleado en la Bomba V1, por lo que se selecciona una frecuencia de funcionamiento de  $f_i = 60 \text{ Hz}$ .

### 3.3.3 Temperatura de salida

Mediante el valor de la temperatura de salida obtendremos datos muy relevantes para el estudio, como las condiciones de mach en la tobera. En TRZECIAK A.M. [12] encontramos una medición experimental de este valor a lo largo de diversos ciclos de funcionamiento [Figura 4.7].

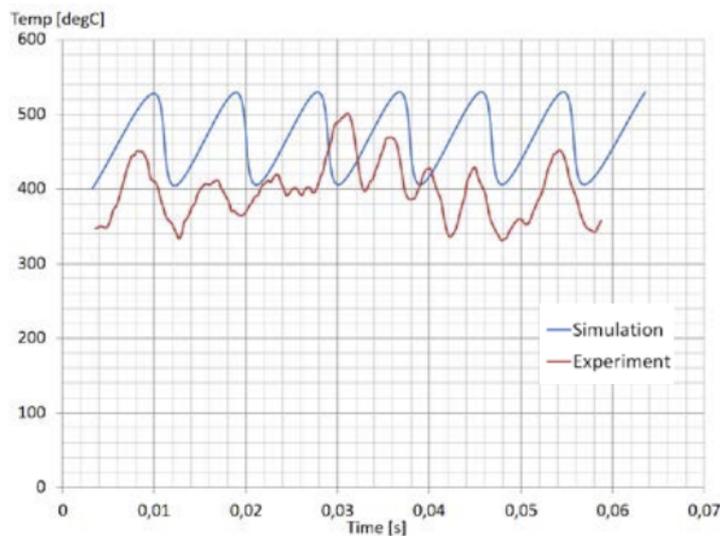


Figura 3.2: Valores experimentales de temperatura de salida de un pulsorreactor TRZECIAK A.M. [12].

Se observa que el valor de temperatura oscila, como cabe esperar, durante cada ciclo. Asimismo, el valor medio de la temperatura en cada una de estas oscilaciones varía de forma errática pero se encuentra alrededor de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Con el propósito de reducir el coste computacional, se asume una temperatura de salida media de  $T_i = 673 \text{ K}$ , constante durante todo el ciclo.

Este valor se variará durante el posterior estudio paramétrico para analizar su influencia sobre las prestaciones de los dispositivos aumentadores de empuje.



## Capítulo 4

# Configuración del modelo

Durante este capítulo se detallará el preproceso tanto del caso base como del estudio paramétrico realizado posteriormente. Éste comprende la creación del dominio geométrico del problema, de la malla y la selección de los modelos físicos utilizados en la simulación.

Para la resolución de este caso y todos los siguientes, se utiliza el software de dinámica de fluidos computacional Simcenter STAR-CCM+.

### 4.1 Solver

Para modelar el tiempo durante este estudio se selecciona el *solver* PISO transitorio, una extensión del reconocido algoritmo SIMPLE, ampliamente utilizado en aplicaciones de mecánica de fluidos computacional.

Este modelo emplea el algoritmo PISO para resolver el sistema de ecuaciones discretizadas del flujo en el dominio. Por cada paso de tiempo, se realiza un paso predictor seguido de varios pasos correctores, donde las ecuaciones linealizadas se resuelven iterativamente para cada variable [13].

### 4.2 Geometría

La geometría del caso debe confeccionarse de tal manera que represente adecuadamente la tobera mencionada en la Sección 3.2, pero alcanzando un compromiso con el tiempo de cálculo de la simulación. Esto último es acentuado por la naturaleza fuertemente transitoria del fenómeno estudiado, la inclusión de la ecuación de la energía y a no utilizar un modelo de densidad constante. Por esto, se estudia únicamente una mitad de la tobera, asumiendo un plano de simetría a lo largo de su eje.

Otro punto de contención a la hora de realizar el estudio trata sobre la inclusión de la tobera primaria dentro del dominio. Pese a que suponer que la condición de contorno de entrada de aire se encuentre en la salida de la tobera primaria presenta ventajas como el ahorro de coste computacional, puede adulterar el fenómeno físico que se estudia. Esto se debe a que, como se explicó previamente, la formación de ciertas estructuras de flujo a la salida de la tobera puede contribuir a mejorar el efecto de los aumentadores de empuje.

Otra forma de solventar este problema es añadir un perfil de velocidades impuesto a la condición de contorno de entrada a la salida de la tobera primaria. Finalmente no se ha decidido

tomar este curso de acción, debido a que ya se estaba empleando la condición de velocidad de entrada variable en el tiempo, e incluir a su vez un perfil de velocidad predeterminado introduce gran complejidad en el estudio. Por otra parte, resulta de interés en el trabajo poder evaluar la influencia de los fenómenos de flujo causados por la interacción de ambas toberas, así como evaluar el desarrollo de las estructuras de flujo durante el transitorio de expulsión.

Las dimensiones del dominio pueden visualizarse en la Figura 4.1.

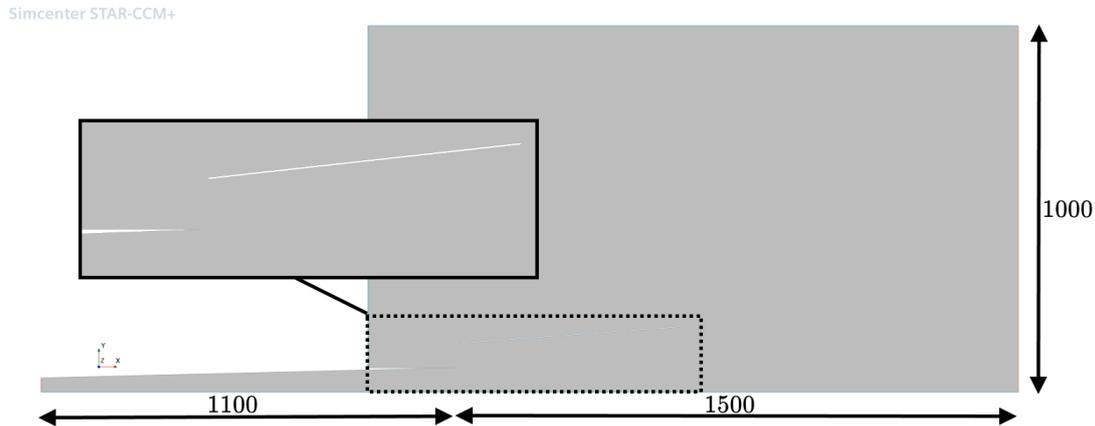


Figura 4.1: Dominio del flujo en STAR-CCM+, dimensiones en milímetros. Detalle de la ranura y tobera secundaria.

## 4.3 Modelos físicos

### 4.3.1 Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS)

Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden representarse promediadas en el tiempo mediante la descomposición de Reynolds. Esta diferencia una variable cambiante en una cantidad promediada en el tiempo y otra que fluctúa [14]. En la Figura 4.2 se visualiza esta descomposición. La línea continua representa el valor real de la cantidad  $u_i$ , es decir, la suma de la fluctuante y la promediada, mientras que la línea discontinua representa esta última componente. La cantidad fluctuante vendría representada por la diferencia de estas dos magnitudes (Ecuación 4.1). El desarrollo completo de estas ecuaciones puede encontrarse en [15].

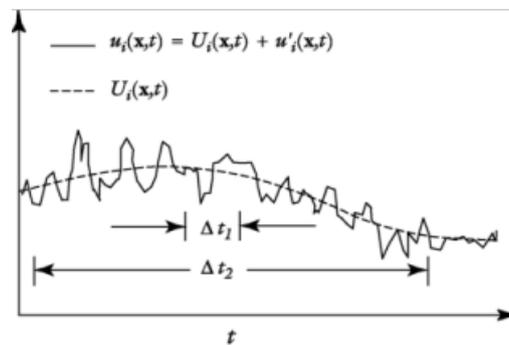


Figura 4.2: Descomposición de Reynolds para variables cambiantes

$$u(x, y, z, t) = \overline{U(x, y, z)} + u'(x, y, z, t) \quad (4.1)$$

### 4.3.2 Modelo de turbulencia k-epsilon realizable

El modelo de turbulencia k-epsilon utiliza dos ecuaciones para resolver las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta  $k$ . Este aproxima los fenómenos de turbulencia en flujos de alta complejidad a través de dos parámetros  $k$  y  $\epsilon$ , que representan la ya mencionada energía cinética turbulenta y su razón de disipación respectivamente [16].

Concretamente, para el estudio se utiliza la versión del modelo k-epsilon realizable. Ésta añade una nueva ecuación de transporte para la razón de disipación turbulenta  $\epsilon$  y una variable de amortiguación. Las ecuaciones de transporte consideradas se especifican en la Ecuación 4.3 [17].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} P_b + S_\epsilon \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\text{Donde : } C_1 = \max \left[ 0,43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (4.3)$$

En estas ecuaciones,  $P_k$  representa la generación de energía cinética turbulenta debida a gradientes de velocidad promediados,  $P_b$  es la generación de energía cinética turbulenta debida a efectos de flotación.  $Y_M$  representa la contribución de la dilatación fluctuante sobre la turbulencia compresible para el ratio de disipación global.  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_{1\epsilon}$  son constantes.  $S_k$  y  $S_\epsilon$  son los términos fuente definidos [18].

El modelo k-epsilon estándar ofrece mejores resultados respecto a otros modelos de turbulencia en varias aplicaciones de cálculo de mecánica de fluidos computacional [16], y en este caso se selecciona debido a su bajo requerimiento computacional y buena interacción del flujo con geometría compleja.

### 4.3.3 Flujo segregado

Los modelos de flujo resuelven las ecuaciones de conservación de masa y momento. El modelo de flujo segregado soluciona cada una de las ecuaciones de momento a su vez por cada dimensión. Posteriormente, se relaciona con la ecuación de continuidad a través de un modelo predictor-corrector [13].

### 4.3.4 Salto de tiempo adaptativo

Un adecuado dimensionamiento del salto de tiempo en una simulación de un transitorio constituye una variable fundamental para asegurar que las estructuras de flujo se desarrollan de forma fiable. Un salto de tiempo muy pequeño produce una dinámica de flujo mucho más fidedigna al fenómeno estudiado, pero a expensas de un coste computacional exponencialmente más elevado.

Aparentemente, debe alcanzarse un compromiso entre fiabilidad de la solución y tiempo de simulación. Aún así, establecer un valor constante para este salto puede resultar ineficiente en

este caso, ya que algunas fases del transitorio requieren un salto de tiempo más acotado mientras que otras permiten relajar este factor. Esto provoca imprecisiones y coste computacional innecesario respectivamente.

Para dar solución a este problema, STAR-CCM+ incorpora la posibilidad de variar el tamaño del salto de tiempo de forma adaptativa. Mediante un valor máximo de CFL impuesto por el usuario se varía el valor del *time step* para que este se mantenga contenido.

### Número de Courant-Friedrichs-Levy (CFL)

El número de Courant-Friedrichs-Levy, o también conocido como CFL o C, es el cociente entre el intervalo de tiempo y el tiempo de residencia en un volumen finito [19]. Indica simplifícadamente cuánta información está atravesando una celda del dominio computacional por cada unidad de tiempo, tal y como se visualiza en la Figura 4.3. Viene dado por la Ecuación 4.4.

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta t/u} \quad (4.4)$$

Donde C representa el número de Courant,  $\Delta t$  el intervalo de tiempo y u la velocidad.

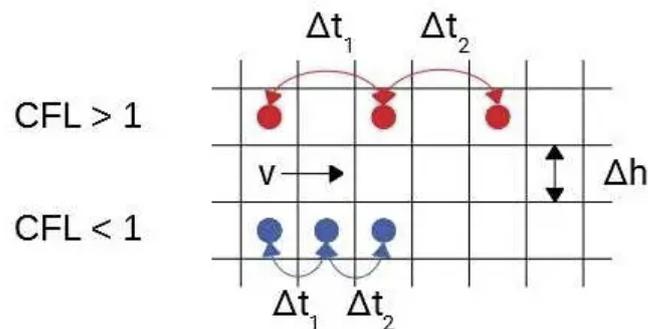


Figura 4.3: Visualización del número de CFL sobre una malla computacional [20].

Se observa que para un número de Courant superior a la unidad, la información pasa por más de una celda para cada unidad de tiempo, por lo que la solución se vuelve imprecisa.

El número de Courant puede ser utilizado en simulaciones de dinámica de fluidos computacional para evaluar los requerimientos de tamaño de salto de tiempo en simulaciones transitorias, para un tamaño de malla y velocidad del flujo dadas. Este coeficiente está relacionado con la condición de estabilidad en esquemas numéricos [20].

### Refinamiento de malla adaptativo (AMR)

Una alternativa a la técnica descrita en este apartado es el refinamiento de malla adaptativo, conocido por sus siglas en inglés como AMR. Es un método para adaptar la precisión de una solución dentro de ciertas regiones sensibles o turbulentas de la simulación [21], variando el tamaño local de las celdas en estas zonas para cada salto de tiempo.

### 4.3.5 Ecuación de la energía: flujo segregado (temperatura)

Para asegurar que la solución simulada pueda considerarse representativa del fenómeno físico estudiado, ha de incluirse en el cálculo la ecuación de la energía. Esto se debe a que dicho fenómeno involucra intercambio de calor tanto con el medio fluido, como conversión de calor en energía cinética. La ecuación de la energía a resolver se especifica en la Ecuación 4.5 [13].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E dV + \oint_A \rho H \mathbf{v} \cdot d\mathbf{a} = - \underbrace{\oint_A \dot{\mathbf{q}}'' \cdot d\mathbf{a}}_{\text{Conducción}} + \underbrace{\oint_A \mathbf{T} \cdot \mathbf{v} d\mathbf{a}}_{\text{Trabajo viscoso}} + \int_V \mathbf{f}_b \cdot \mathbf{v} dV + \oint_A \sum_i h_i J_i d\mathbf{a} + \int_V S_u dV \quad (4.5)$$

Donde:

- $E$  es la energía total.
- $H$  es la entalpía total.
- $\dot{\mathbf{q}}''$  es el vector de flujo de calor.
- $\mathbf{T}$  es el tensor de esfuerzos viscosos.
- $\mathbf{v}$  es el vector velocidad.
- $\mathbf{f}_b$  es el tensor de fuerza del cuerpo, representando las combinaciones de fuerzas de rotación y gravitacionales.
- $h_i$  es la entalpía del componente  $i$ .
- $J_i$  es el componente del flujo difusivo del componente  $i$ .
- $S_u$  es un término fuente definido por el usuario.

Por otra parte, es sabido que la energía total  $E$  se relaciona con la entalpía  $H$  mediante la expresión:

$$E = H - \frac{p}{\rho} \quad (4.6)$$

Existen varias formas de resolver esta ecuación en el transcurso de una simulación. En el caso del modelo escogido (*Segregated Fluid Temperature*) la temperatura es la variable a resolver, y la entalpía se computa mediante la ecuación de estado.

## 4.4 Definición de condiciones de contorno

Las condiciones de contorno del estudio pueden visualizarse en el diagrama de la Figura 4.4.

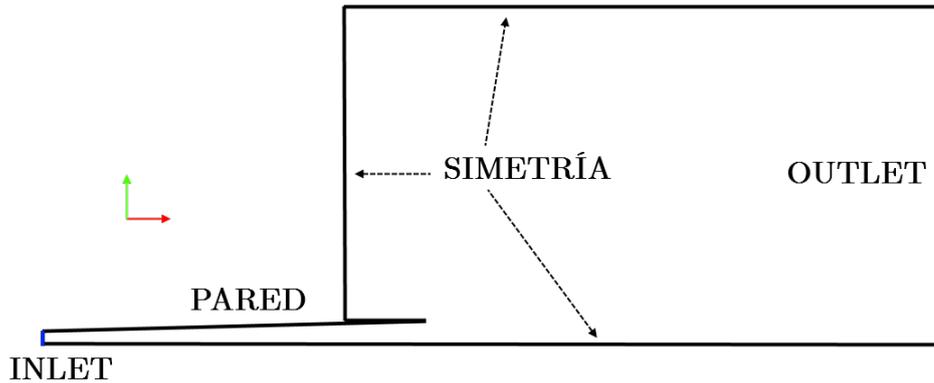


Figura 4.4: Dominio de la simulación con condiciones de contorno

En primer lugar, se define la condición de entrada de aire en el inicio de la tobera principal divergente. Este lugar se escoge frente a la salida de la tobera para simular adecuadamente la distribución de velocidades a su salida, ya que puede afectar al efecto de englobamiento de aire en la ranura. Esta condición impondrá una velocidad de expulsión del flujo, la cual se introduce interpolando una tabla con valores previamente calculados.

La condición de contorno de pared es utilizada en la tobera principal y posteriormente en la tobera secundaria una vez haya sido introducida en el estudio. Sobre ella se impone una condición de no deslizamiento, y podrá evaluarse añadiendo una capa límite prismática para obtener mayor precisión sobre el cálculo, aunque durante el estudio se demostrará que en este caso no aporta una gran diferencia en el resultado.

Los límites superior e inferior, así como el borde izquierdo del dominio tomarán la forma de condiciones de simetría. Esto permite reducir el dominio computacional de la simulación sin afectar al flujo. Puede definirse como una "pared con deslizamiento" [13].

Finalmente, aguas abajo se define la condición de salida, la cual impone un valor de presión (*pressure outlet*). Existen diversas formas de imponer esta presión sobre las celdas circundantes a la frontera: en este caso, se utilizará el promedio de estas, variándolo para mantenerlo dentro de la referencia. Esto permite una mayor flexibilidad ante casos fuertemente no estacionarios.

## 4.5 Estrategia de mallado

Una vez definida la geometría y condiciones de contorno, se crea la malla por la cual se resuelve el problema.

Para ello, se empleará la potente herramienta integrada de mallado que incluye STAR-CCM+, cuya intuitiva interfaz permite un diseño iterativo de la malla deseada. El usuario puede ajustar a través de varios parámetros las características de esta malla para adaptarse a las necesidades específicas del caso. En este estudio, resulta determinante el coste computacional, por lo que tratará de minimizarse reduciendo el número de celdas al mínimo necesario.

Por otra parte, debido a la naturaleza fuertemente transitoria del flujo durante el estudio, los fenómenos derivados de la capa límite pierden relevancia frente a otros aspectos físicos del

problema. Es por ello, y como quedará demostrado durante el estudio de sensibilidad de malla, que se prescinde de incluir una capa límite prismática excesivamente detallada.

Establecido esto, se selecciona un tamaño base de 7 milímetros (10 milímetros en el caso base descrito en la Sección 4.7), y se estructura la malla con dos refinamientos tal y cómo se visualiza en la Figura 4.5. Estos reducen este tamaño un 40% y 25% respectivamente. Definir zonas de mayor refinamiento en la malla con este método permite un control preciso sobre las dimensiones de las celdas que la componen, permitiendo ahorrar coste computacional en otras zonas del dominio.

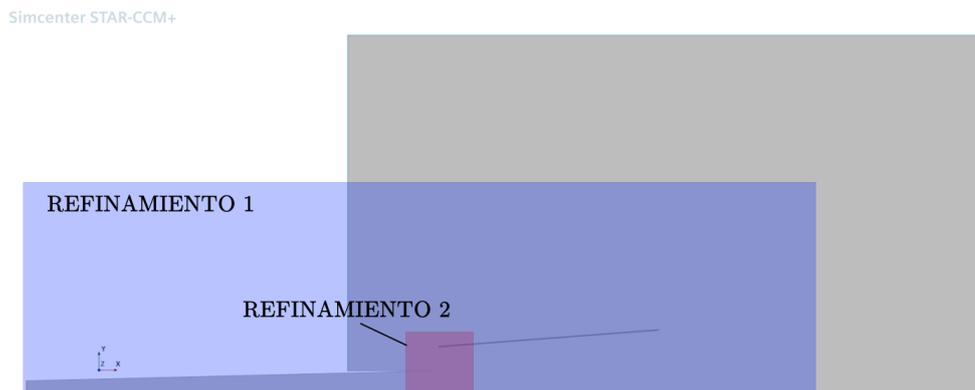


Figura 4.5: División del dominio en refinamientos durante el mallado. En azul, el refinamiento 1 reduce el tamaño base un 40%, mientras que en rojo el segundo lo hace a razón del 25%.

Finalmente, se realiza el mallado mediante cuadriláteros y se añade una capa límite prismática conformada por 7 celdas con una razón de crecimiento de 1,2. La malla resultante se representa en la Figura 4.6.

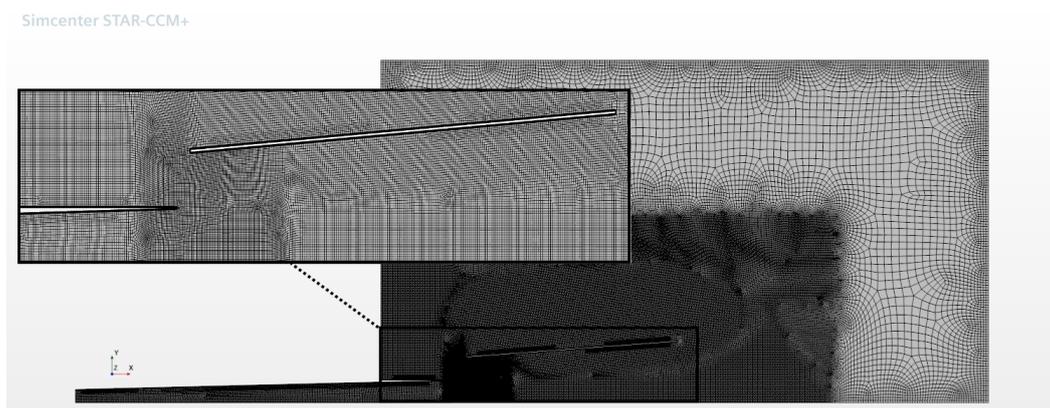


Figura 4.6: Malla resultante empleada en el estudio paramétrico.

## 4.6 Monitores de variables de estudio

Para obtener información valiosa acerca del fenómeno físico que se pretende estudiar, han de poder cuantificarse las variables que intervienen en su desarrollo.

Para ello, se establecen monitores de las variables de interés en diferentes secciones de la geometría, como las salidas de las tobera principal y secundaria, y la ranura entre ambas. En ellos, se medirá el flujo másico y la velocidad de salida principalmente, que serán representadas durante próximas secciones y servirán de gran utilidad en la interpretación física.

## 4.7 Velocidad de salida

El dato de la velocidad de salida es determinante en este estudio. Su obtención resulta de combinar los datos proporcionados anteriormente y, mediante un cálculo CFD de la tobera principal, ajustar su valor hasta alcanzar el empuje de referencia.

Para ello, se introduce la geometría base en STAR-CCM+, las condiciones iniciales del problema y un valor de la velocidad de salida inicial. En este caso, se evaluará la tobera principal, y se ajustará la velocidad de salida en función del empuje generado por ésta, hasta alcanzar un valor cercano al de referencia.

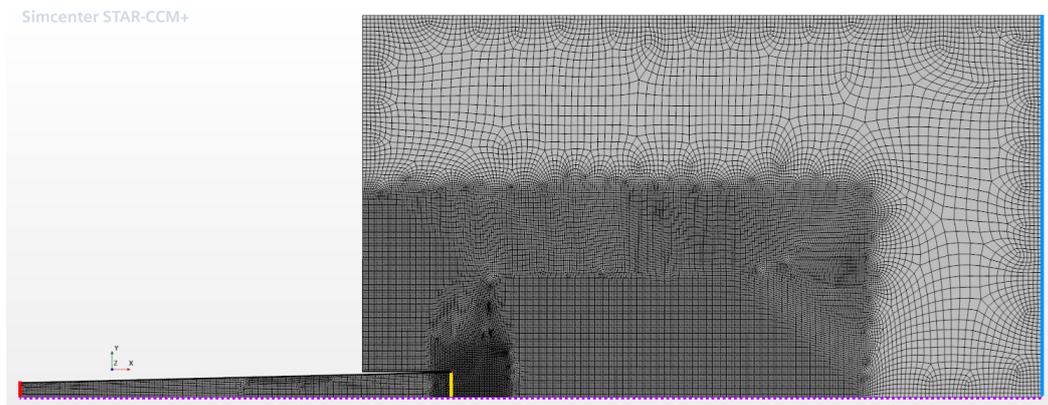


Figura 4.7: Malla del caso base: destacados de izquierda a derecha la condición de contorno de inlet, eje de simetría, medida de gasto en tobera y outlet

La velocidad en la salida no puede considerarse constante debido a la naturaleza pulsante del flujo considerado. Para emular fiablemente este comportamiento, se asume que en la condición de contorno de velocidad esta oscilará a razón de una función senoidal. Dado que la fase de aspiración trasiega un menor flujo másico que la fase de expulsión de los gases, serán dos funciones senoidales concatenadas las que sean utilizadas en el estudio, con diferentes valores máximos y mínimos. Esto es implementado en STAR-CCM+ interpolando una tabla de valores de la velocidad [Figura 4.9]. Se simulan tres pulsos, y el valor de máximo empuje es tomado en el tercer pulso con el fin de evitar el transitorio del remanso.

Se realizan varias simulaciones para diferentes valores de velocidad de salida, y los valores de empuje obtenidos se representan en la Figura 4.8. La validez de los datos se comprueba mediante un estudio de sensibilidad de malla, detallado en la Subsección 4.7.1. Estos resultados confirman la hipótesis de flujo subsónico.

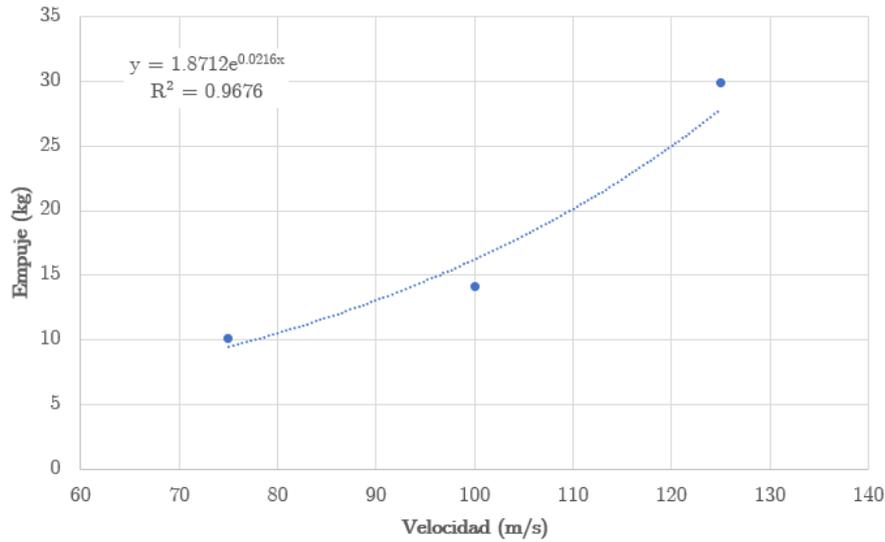


Figura 4.8: Empuje simulado frente a velocidad de la condición de entrada

Finalmente, se selecciona la función a trozos [4.7] para representar la variación de la velocidad de salida en el inicio de la tobera principal. Este valor máximo de velocidad proporciona un empuje pico de valor 14,10 kg, el cual presenta una variación del 6% respecto al valor de referencia buscado.

$$V_{inlet}(t) = \begin{cases} |97,5 \sin(60 \pi t)|, & \text{expulsión} \\ -|23,6 \sin(60 \pi t)|, & \text{aspiración} \end{cases} \quad (4.7)$$

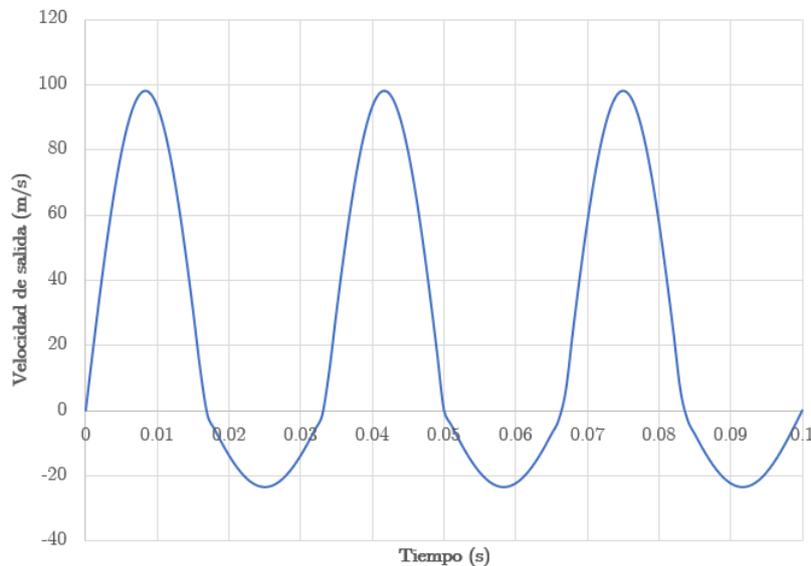


Figura 4.9: Velocidad en condición de contorno de entrada en función del tiempo

#### 4.7.1 Sensibilidad de malla: caso base (tobera primaria)

Para poder utilizar de forma fiable los resultados obtenidos del caso base en la estimación de la velocidad de salida, se realiza un estudio de sensibilidad de malla.

Tomando como referencia el dato de flujo másico a través de la salida de la tobera principal, se modifican los parámetros que definen la malla, refinándola en varios pasos, y midiendo la variación del valor de referencia del caso base. En el caso de producirse una divergencia entre los valores obtenidos en cada paso puede indicar que los resultados obtenidos presentan una dependencia de con la estructura de la malla, lo que puede poner en duda la fiabilidad del modelo.

En este caso, se han considerado tres refinamientos sucesivos de la malla original, representados en la Figura 4.10 y definidas por los parámetros de la Tabla 4.1.

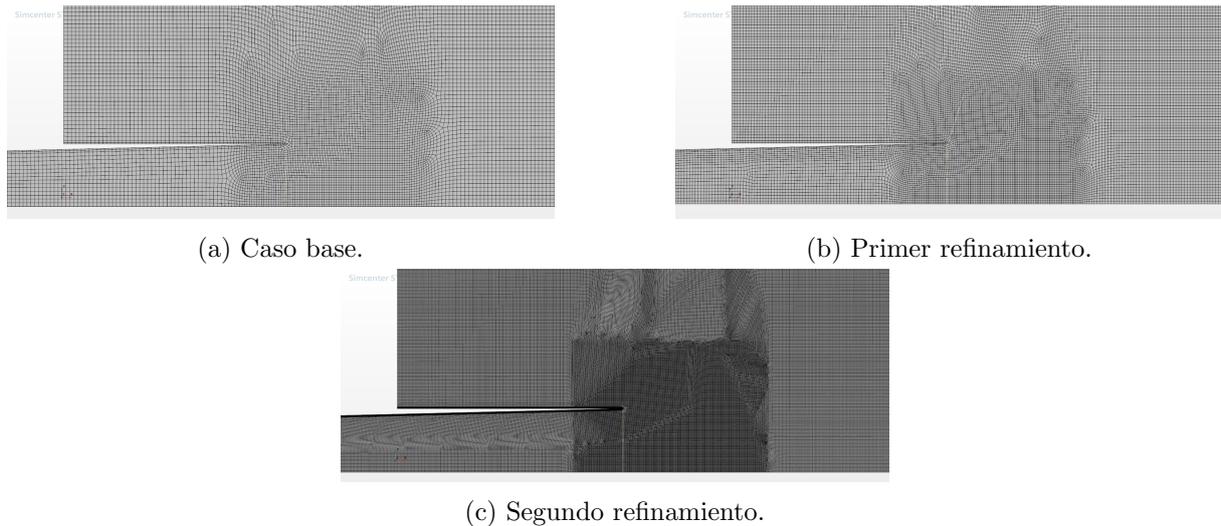


Figura 4.10: Pasos del estudio de sensibilidad de malla del caso base.

	<b>Malla base</b>	<b>Refinamiento 1</b>	<b>Refinamiento 2</b>
<b>Nº de celdas</b>	53.059	95.448	763.399
<b>Tamaño base (m)</b>	0,01	0,0075	0,0025
<b>Nº capas prismáticas</b>	2	2	15

Cuadro 4.1: Parámetros de malla del estudio de sensibilidad del caso base

Finalmente, se ejecuta el cálculo con las condiciones de contorno e iniciales descritas durante las anteriores subsecciones. En la Tabla 4.2 encontramos los valores arrojados por la simulación, en los que observamos que el valor de flujo másico bidimensional en el instante de tiempo evaluado presenta una mínima variación.

	<b>Malla base</b>	<b>Refinamiento 1</b>	<b>Refinamiento 2</b>
<b>Flujo másico 2D (kg/s)</b>	3.967478	3.900752	3.945770
<b>Desviación (%)</b>	+0,55	-1,14	0

Cuadro 4.2: Variación del parámetro de referencia en el instante considerado

Asimismo, en el gráfico representado en la Figura 4.11 podemos ver que no se producen variaciones significativas del parámetro de referencia durante el tiempo de cálculo. Cabe resaltar que, durante la fase de aspiración sí pueden apreciarse diferencias poco significativas. Esto se

produce debido al aumento de inestabilidad de la solución durante esa fase del transitorio, pero no influye en otros momentos más críticos para el cálculo (fase de expulsión semiestacionaria).

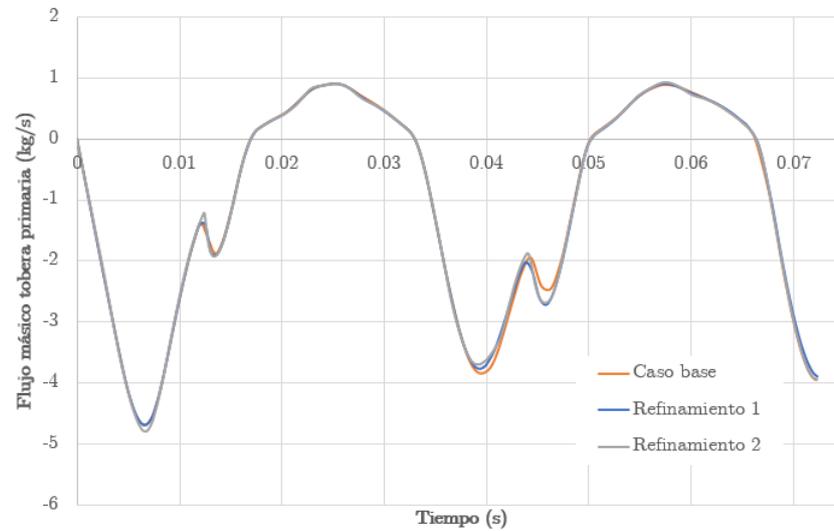


Figura 4.11: Flujo másico en la salida de la tobera principal en función del tiempo para diferentes refinamientos de malla

Finalmente, se valida el valor de velocidad de salida de referencia de la tobera primaria, fundamental en el desarrollo del resto del estudio.



# Capítulo 5

## Análisis del caso base

Durante este capítulo se afrontará la resolución de un caso base, por el cual se estudiará un ejemplo de aumentador de empuje. El propósito de esta fase del estudio será establecer un caso simple con el que validar el funcionamiento de estos dispositivos, y sobre el que realizar las modificaciones precisas durante el próximo estudio paramétrico.

### 5.1 Aumentador

Las dimensiones del aumentador se deciden en función de ejemplos observables en la referencia bibliográfica. Se selecciona una tobera secundaria divergente de 40 centímetros de longitud, con unas secciones de entrada y salida de 23 y 25 centímetros respectivamente. La longitud de ranura, es decir, la separación entre la salida de la tobera primaria y la entrada de la secundaria se establece a 1,25 centímetros. Los datos relativos a la geometría del caso se recogen en la Tabla 5.1.

	$L$	$D_{IN}$	$D_{EX}$	$L_R$ (m)	Rel. expansión (-)
<b>Tobera primaria</b>	1,100	0,076	0,133	-	1,750
<b>Tobera secundaria</b>	0,400	0,230	0,250	0,0125	1,182

Cuadro 5.1: Parámetros geométricos de referencia en el caso base. Las unidades vienen dadas en el Sistema Internacional.

Donde  $L$  representa la longitud de la tobera,  $D_{IN}$  y  $D_{EX}$  los diámetros de entrada y salida respectivamente, y  $L_R$  la longitud de la ranura entre ambos cuerpos en la dirección axial tal y como se definieron en la Sección 3.1.

### 5.2 Análisis de los resultados

Durante esta sección se presentan los resultados obtenidos de la simulación del caso base con tobera secundaria. Se expondrá la variación temporal de diferentes parámetros de relevancia y se dará sentido físico a las conclusiones aportadas por la simulación. Finalmente, se discute el rendimiento del dispositivo.

### 5.2.1 Flujo másico

La Figura 5.1 muestra la evolución temporal del flujo másico trasegado a través de la salida de la tobera secundaria. Este dato resulta determinante para estimar el empuje máximo generado por el dispositivo. Superpuesto a este, se observa la variación del valor de velocidad en la entrada del dominio, condición de contorno establecida durante las secciones previas. Esto permite visualizar la respuesta de sistema a este estímulo.

El primer pulso provoca una gran expulsión de aire, inicialmente en remanso y a baja temperatura, de las toberas. Esto provoca que, al encontrarse este gas a una densidad superior, aumente significativamente el valor de flujo másico a la salida durante la primera fase de expulsión. Como cabe esperar, según se desarrolla la simulación estos valores convergen a un quasi-estacionario. Durante este y los consiguientes estudios, se tomarán los valores del tercer pulso a la hora de evaluar las prestaciones del dispositivo.

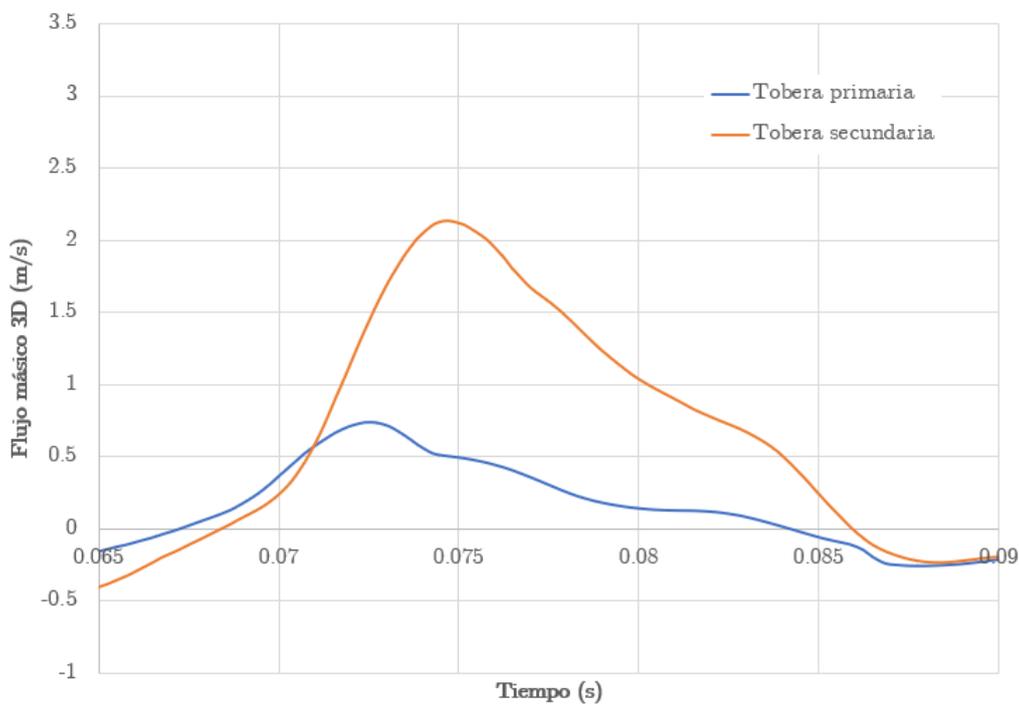


Figura 5.1: Evolución del flujo másico trasegado por diferentes estaciones frente al tiempo de simulación.

En el diagrama, se distinguen las diferentes fases que componen el ciclo de expulsión.

Cuando inicialmente se produce la perturbación, el aire entra progresivamente desde la entrada de la tobera primaria, y se observa un incremento del flujo másico en sentido negativo desde la ranura. Esto se debe a que el gas escapa desde la tobera primaria hacia el flujo libre a través de esta, tal y como se observa en la Figura 5.2. Este fenómeno persiste únicamente durante un breve instante de tiempo al inicio del ciclo. Aún así, produce una pérdida de flujo másico útil para la expansión en tobera secundaria. Minimizar este efecto mejoraría la eficiencia del dispositivo durante esta etapa proceso de expulsión de gas.

Durante la primera mitad del ciclo se observa que, como cabe esperar, hay un retraso entre la respuesta de la tobera primaria y secundaria. Posteriormente, esta situación se revierte, y

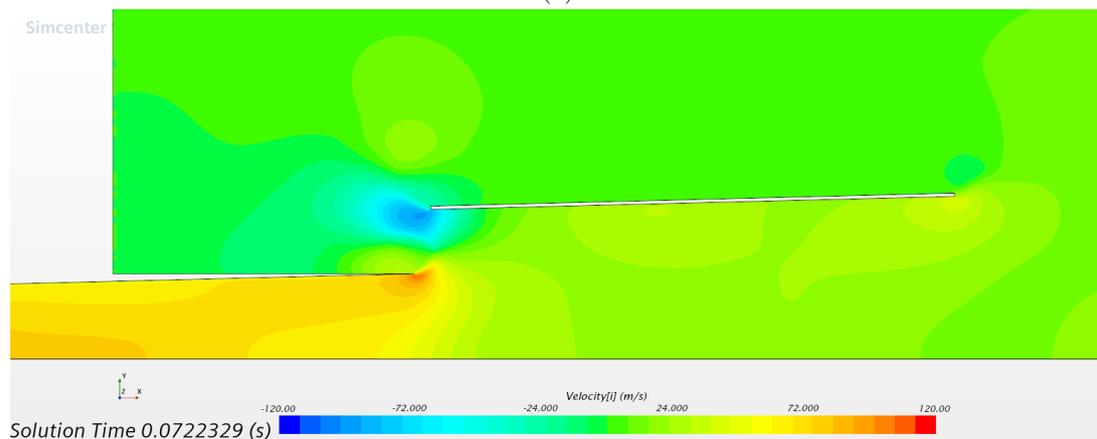
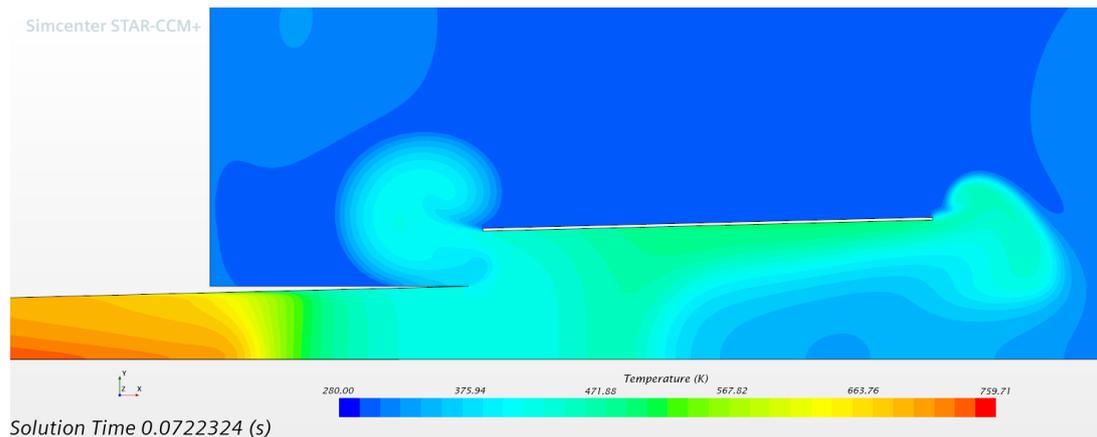


Figura 5.2: Representación de los contornos de temperatura y velocidad axial del caso base en el momento del inicio de la expulsión de gases en la tobera primaria. Se observa como parte de los gases calientes fugan a través de la ranura.

la tobera secundaria expulsa más aire durante más tiempo, produciendo un empuje residual adicional a la tobera primaria. Esto puede contribuir a que al medir el empuje en un estudio experimental, el valor medio del empuje a lo largo del ciclo sea mayor. Durante esta fase tardía del ciclo, la entrada de aire fresco por la ranura contribuye a aumentar el flujo másico trasegado.

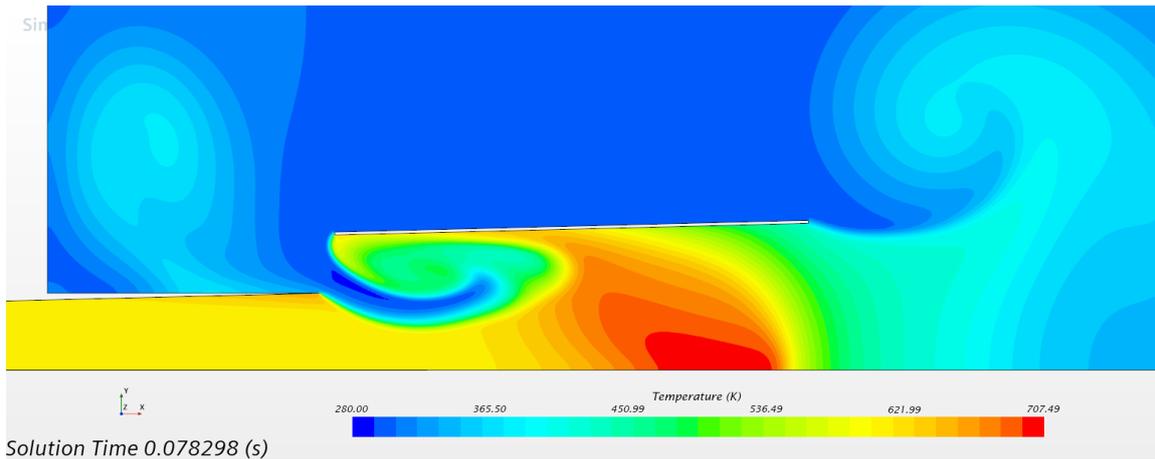


Figura 5.3: Contorno de temperatura del dominio durante la fase de succión a través de la ranura. Se observa como la bajada de presión causada por el flujo a gran velocidad fuerza al aire fresco circundante a atravesar esta ranura, aumentando el gasto másico total.

El aumento del flujo másico pico de la tobera secundaria respecto a la primaria puede encontrar su explicación en el mayor volumen del flujo contenido en esta segunda. Éste, al ser empujado por los gases salientes, produce una lectura de flujo másico superior en el monitor.

### 5.2.2 Perfil de velocidades

Otro dato relevante en el cálculo del empuje es la velocidad de salida en tobera. La Figura 5.4 presenta la distribución de velocidades a lo largo del eje vertical, sobre la que se indica la media aritmética de esta. Estos corresponden al momento durante el tercer ciclo simulado donde se produce el máximo valor de empuje

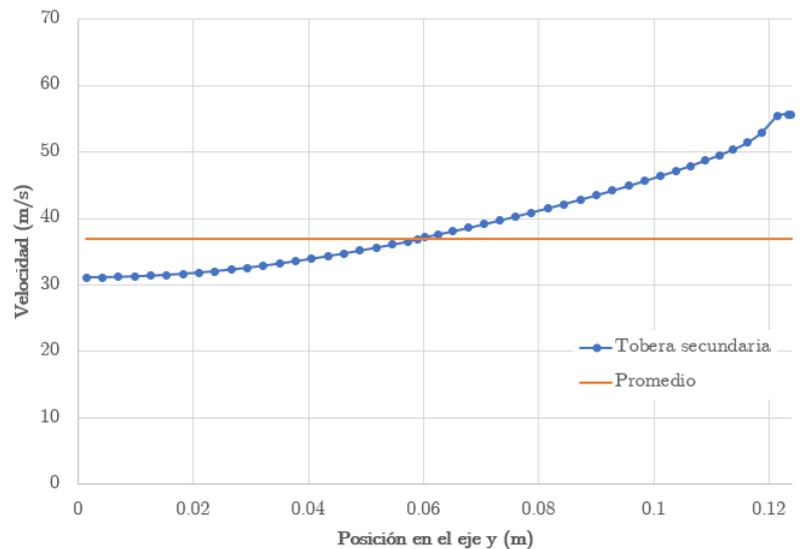


Figura 5.4: Representación del perfil de velocidades a la salida de la tobera secundaria y de su valor promedio.

El valor medio de la velocidad que trasiega la tobera secundaria resulta ser 36,94 m/s. Esto constata una deceleración del flujo a lo largo del dispositivo, compensada por un aumento del

flujo másico trasegado.

### 5.2.3 Cálculo del empuje pico

La expresión general por la cual se calcula el empuje viene dada por 5.1.

$$N = \dot{m}_2 v_2 - m_0 v_0 + (p_2 - p_0) A_2 \quad (5.1)$$

En este caso, puede despreciarse la contribución de la diferencia de presiones ya que resulta ser muy pequeña. Asimismo, la velocidad del flujo libre se considera nula, y su valor de presión cercano al de la salida de la tobera secundaria ( $p_0 \simeq p_2$ ). Mediante estas simplificaciones, la expresión anterior puede reescribirse como:

$$N = \dot{m}_2 v_2 \quad (5.2)$$

Lo cual facilita de gran manera los cálculos de empuje durante el postprocesado. Para el cálculo de este parámetro durante todo el estudio, se simulan tres pulsos y se evalúan los valores del último, con el fin de asegurar la estabilidad y convergencia de la solución cuando se toman los datos. Finalmente, y tras aplicar la corrección tridimensional explicada en la subsección 5.2.3, se llega al valor de empuje máximo.

$$N = 5,46 \cdot 0,392 \cdot 36,94 = 158,13 \text{ N} = 16,12 \text{ kg} \quad (5.3)$$

Este resultado mejora el empuje obtenido del estudio de la tobera primaria un total de 2,01kg, lo cual supone un aumento del 14,1%. Durante el posterior estudio paramétrico, se optimizará la geometría del aumentador y variarán las condiciones de contorno tratando de aumentar este valor de empuje máximo.

### Corrección tridimensional del flujo másico

El valor de flujo másico computado corresponde a una simulación bidimensional, por tanto, ha de ser corregido para tener en cuenta la geometría tridimensional del modelo. De [22], se obtiene la corrección tridimensional para este caso:

$$\dot{m}_{2D} = \dot{m}_{3D} \frac{H \cdot L_{ref}}{A_{3D}} \quad (5.4)$$

Siendo  $H$  la altura del puerto 2D,  $L_{ref}$  la longitud de referencia, que en este caso se toma como 1 metro, y  $A_{3D}$  el área tridimensional de la sección.

### 5.2.4 Cálculo de empuje medio

Resulta de interés analizar cómo varían los valores de empuje producidos por ambas toberas a lo largo del ciclo. La forma de evolución del flujo másico parece indicar que el aumentador, además de incrementar el valor de empuje máximo, también proporciona mayor empuje residual en la fase tardía de la expulsión de gases. Esta teoría cobra fuerza al observarse la ingestión de aire fresco que se produce en esa fase del ciclo. A través de este análisis se profundizará en esta hipótesis.

Para obtener estos valores de empuje se evalúan los monitores mencionados anteriormente en diferentes instantes del ciclo, y se representan interpolando la función de empuje en función del tiempo. Comparando las lecturas de tobera primaria y con aumentador se establece la razón

de incremento para cada instante.

En la Figura 5.5 se representa la variación de empuje en cada caso para su mejor visualización. Asimismo, se indica el empuje medio producido durante el ciclo de expulsión, cuyos valores resultan ser 7,22 kg para el caso sin aumentador, y 11,15 kg para el aumentado. Esto supone un incremento del 54 %, muy superior al obtenido para el empuje pico durante la anterior sección.

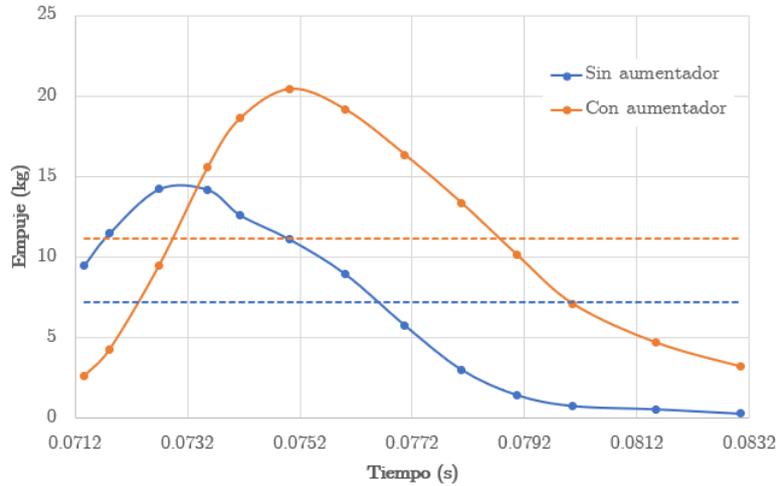


Figura 5.5: Evolución temporal del empuje producido en los casos con y sin aumentador.

En la Figura 5.6 puede observarse cómo varía el aumento de empuje en función del tiempo. Este encuentra un valor máximo durante la fase de expulsión de gran parte de los gases de escape, pero en lugar de formar un pico propio de la función senoidal de la velocidad, se mantiene en el tiempo unos instantes. Esto cimienta aún más la teoría de que la contribución al aumento de empuje de estos dispositivos también se obtiene alargando la fase de generación de empuje.

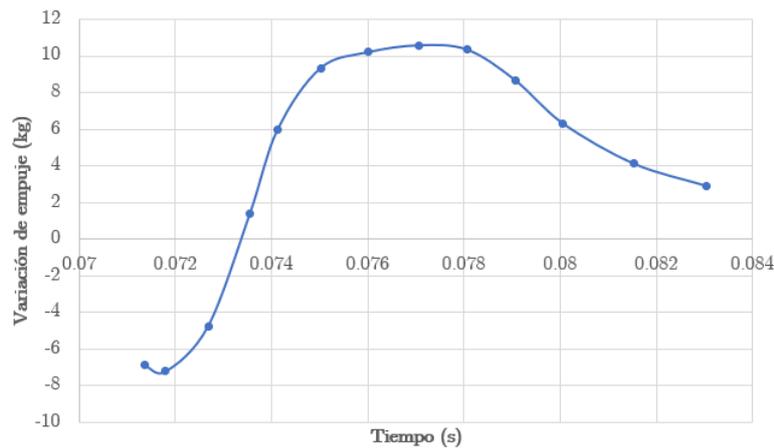


Figura 5.6: Evolución temporal de la variación de empuje obtenida entre los casos sin y con aumentador.

Durante las fases iniciales del ciclo, la variación de empuje es aparentemente negativa, pero se debe a que es el punto de máximo empuje de la tobera primaria, mientras que el flujo aún no ha llegado a la secundaria. Por tanto, esa pérdida de empuje no es real, sino fruto del retardo

entre ambas toberas.

### 5.3 Sensibilidad de malla

De nuevo, se vuelve necesario comprobar la validez de los resultados obtenidos con esta simulación. Al añadir una nueva perturbación en el flujo mediante la tobera secundaria, ha de revisarse el estudio de sensibilidad de malla realizado para el caso descrito en la Sección 4.7.1.

Para ello, se tomará como valor de referencia la evolución temporal del flujo másico trasegado por la sección de salida de la tobera secundaria, y se sobrepondrá a dos refinamientos progresivos y un engrosamiento de la malla utilizada. Los parámetros que las definen se encuentran detallados en la Tabla 5.2. En la Figura 5.7 se muestran las cuatro diferentes mallas evaluadas.

	M. gruesa	M. base	Refin. 1	Refin. 2
Nº de celdas	55.084	113.464	256.721	1.241.017
Tamaño base (m)	0,01	0,007	0,0045	0,002
Nº de capas prismáticas	2	7	10	15

Cuadro 5.2: Datos de las diferentes configuraciones de malla utilizadas en el estudio de sensibilidad del caso base.

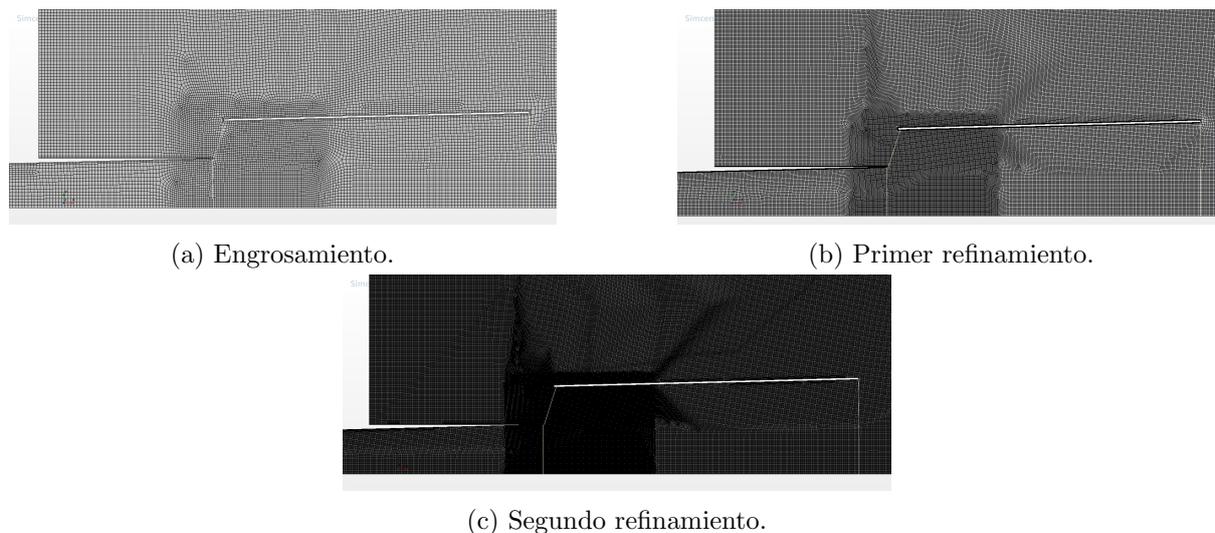


Figura 5.7: Mallas empleadas en el estudio de sensibilidad del caso base.

Una vez se han generado, se ejecuta el cálculo para cada uno de los casos. A través de un monitor en la salida de la tobera secundaria se recoge la evolución temporal del flujo másico a través de esta. Su valor máximo se representa y compara con los diferentes refinamientos en la Tabla 5.3.

	Malla gruesa	Malla base	Refinamiento 1	Refinamiento 2
$\dot{m}_{2D}$ (kg/s)	4,95	5,46	5,44	5,47
Desviación (%)	-9,34	0	-0,37	0,18

Cuadro 5.3: Valores respuesta obtenidos del estudio de sensibilidad del caso base.

Puede observarse que la malla base se aproxima suficientemente a los resultados obtenidos por los refinamientos, por los cuales necesariamente debe obtenerse un resultado con mayor precisión. Debido a esto, y con el propósito de reducir el coste computacional de la simulación, se justifica la necesidad de estudiar una malla más gruesa, para evaluar si la configuración base está sobredimensionada. Puede comprobarse que los resultados de ésta no difieren en gran manera con las demás en la Figura 5.8, pero sí puede observarse una discrepancia en el flujo másico máximo obtenido durante el tercer ciclo. Esto habría infravalorado la medida de empuje, y consecuentemente falseado los resultados obtenidos, por lo que se descarta incluir esta configuración de malla en modelos posteriores.

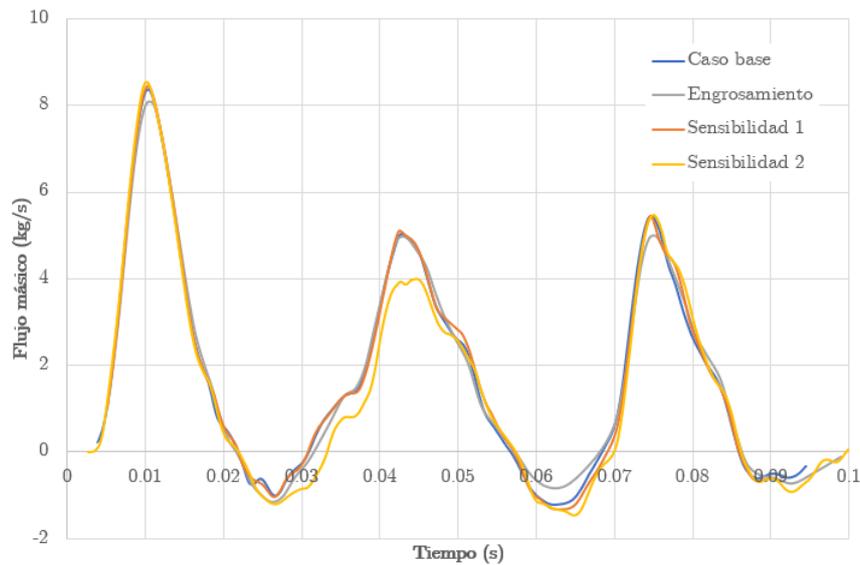


Figura 5.8: Evolución temporal del flujo másico 2D en la tobera secundaria para cada refinamiento.

Cabe resaltar que la malla más fina difiere en el segundo ciclo del resto de refinamientos. Esto no influye en los resultados del estudio al evaluarse únicamente el tercer pulso.



# Capítulo 6

## Estudios de sensibilidad

Durante este capítulo, se estudiará la influencia de varios parámetros sobre el rendimiento del dispositivo propulsivo. Para ello, se definirán ciertas variables que definan la geometría del aumentador, y posteriormente se analizarán diferentes modelos en STAR-CMM+ variando dichos parámetros.

### 6.1 Variación de las condiciones de contorno

A lo largo de esta sección, se presentará la variación del empuje máximo al variar los valores de las condiciones de contorno del problema.

#### 6.1.1 Velocidad de salida

Como se avanzó en secciones anteriores, el valor de la velocidad de salida en la condición de *inlet* es determinante en este estudio. Previamente se calibró este dato para que la simulación del pulsorreactor sin aumentador proporcionase un empuje similar al de la referencia. Durante esta subsección, se variará el pico de velocidad de la función senoidal que define este parámetro, evaluando la respuesta del empuje.

Para ello, se definen cuatro velocidades de entrada (100 m/s, ya estudiado, 150, 200 y 50 m/s), y se simularán recogiendo los datos de flujo másico y perfil de velocidades en las estaciones relevantes. Estas se computan con la corrección tridimensional para mostrar el valor de empuje pico en el instante de estudio. El valor de empuje generado sin aumentador a cada una de las velocidades se resta al del modelo completo.

En la Tabla 6.1 se recogen los resultados de este estudio, y en la Figura 6.1 puede visualizarse claramente la variación de la diferencia del empuje pico con la velocidad de salida. Puede observarse que la tendencia es claramente creciente, llegando a alcanzar valores de aumento de empuje de hasta el 77%. Según se aumenta la velocidad, los dispositivos proveen de un mayor empuje extra en relación al modelo sin aumentar. Esto debe interpretarse con precaución, ya que alcanzar valores de velocidad de salida tan elevados no es realista sobre los modelos de pulsorreactor actuales, tal y como se demostró al ajustar la velocidad al empuje de referencia.

	50 m/s	100 m/s	150 m/s	200 m/s
Flujo másico tobera principal (kg/s)	1.13	1.56	2.12	3.08
Flujo másico tobera secundaria (kg/s)	2.04	4.28	5.91	9.04
Velocidad en tobera primaria (m/s)	43.38	88.70	121.25	172.92
Velocidad en tobera secundaria (m/s)	18.10	36.94	66.54	104.35
Empuje máximo tobera primaria (kg)	5.00	14.10	26.20	54.29
Empuje máximo con aumentador (kg)	3.76	16.12	40.09	96.16
Diferencia (kg)	-1.24	2.02	13.89	41.87
Diferencia (%)	-24.80 %	14.33 %	53,02 %	77,12 %

Cuadro 6.1: Tabla de resultados del estudio paramétrico de variación de velocidad de entrada en tobera principal

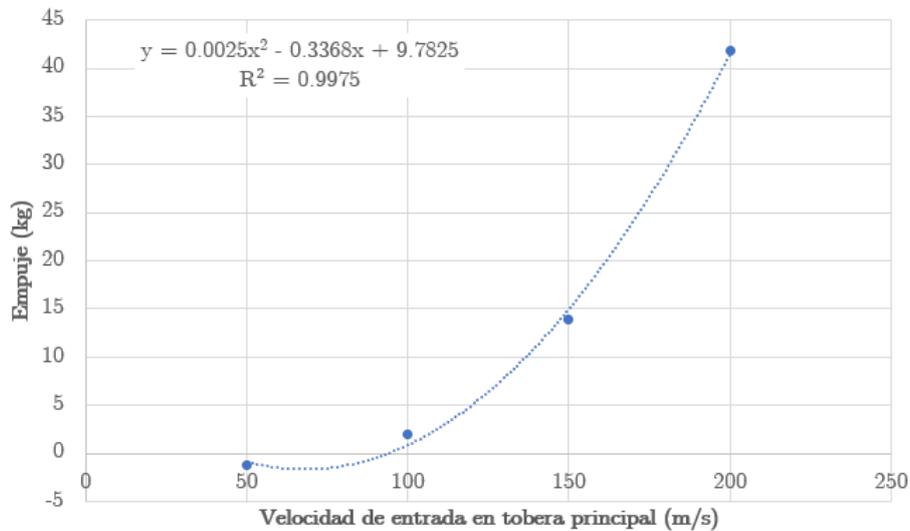


Figura 6.1: Evolución de la variación de empuje entre tobera primaria únicamente y sistema con aumentador de empuje en función de la velocidad de entrada en la tobera principal.

A partir de estos resultados se puede concluir que aumentar la velocidad de entrada en tobera primaria incrementa muy significativamente el aumento empuje en estos dispositivos.

### 6.1.2 Temperatura

La temperatura de entrada en la tobera primaria viene determinada por muchos factores durante el proceso de combustión en el pulsorreactor, fase ajena al actual estudio. Por otro lado, resulta un parámetro de relativamente fácil ajuste, por ejemplo, mediante la selección de combustibles empleados, materiales de construcción más isotermos, etcétera. Por ello, resulta de especial interés dedicar recursos a descubrir la influencia de este parámetro sobre el empuje producido por el conjunto de toberas.

Partiendo del caso de referencia se ejecuta el cálculo para cinco valores de temperatura de entrada: 450, 673, 800, 1000 y 1500 K. De nuevo, se recogen los valores de flujo másico y velocidad instantáneos en el momento de máximo empuje del sistema, y se compara con su contraparte sin tobera secundaria.

En la gráfica representada por la Figura 6.2 se observa la evolución del aumento de empuje en función de la temperatura de entrada en tobera. El caso base se encuentra en un pésimo, mientras que tanto al aumentar como disminuir la temperatura se obtiene un aumento de empuje superior. En el primer caso, se alcanza un valor óptimo alrededor de 800 K, mientras que si se aumenta aún más la temperatura el valor de respuesta converge lentamente.

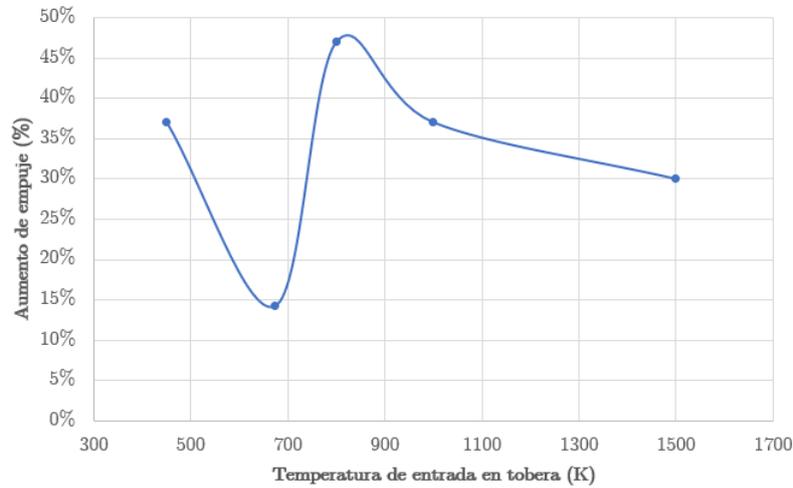


Figura 6.2: Evolución del aumento de empuje respecto a la temperatura de entrada en tobera primaria.

Por otro lado, el flujo másico trasegado disminuye con la temperatura tal y como se observa en la Figura 6.3. Esto encuentra su explicación en la reducción de la densidad que experimenta el aire con el aumento de su temperatura según la ecuación de los gases ideales.

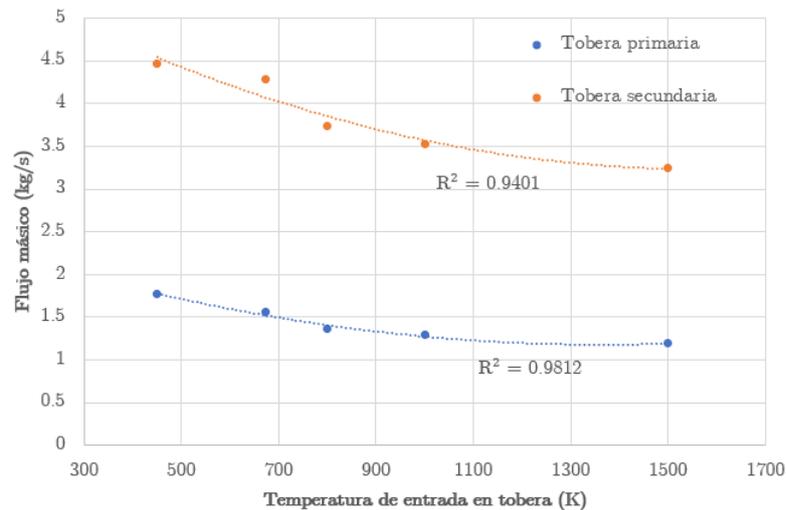


Figura 6.3: Evolución del flujo másico trasegado en tobera secundaria respecto a la temperatura de entrada en tobera primaria.

Finalmente, la Figura 6.4 muestra la evolución del empuje neto en los casos aumentados y sin aumentador según se varía la temperatura. Puede observarse que inicialmente este valor decae con el aumento de temperatura hasta alcanzar un mínimo, y según se aumenta a valores

más altos vuelve a crecer.

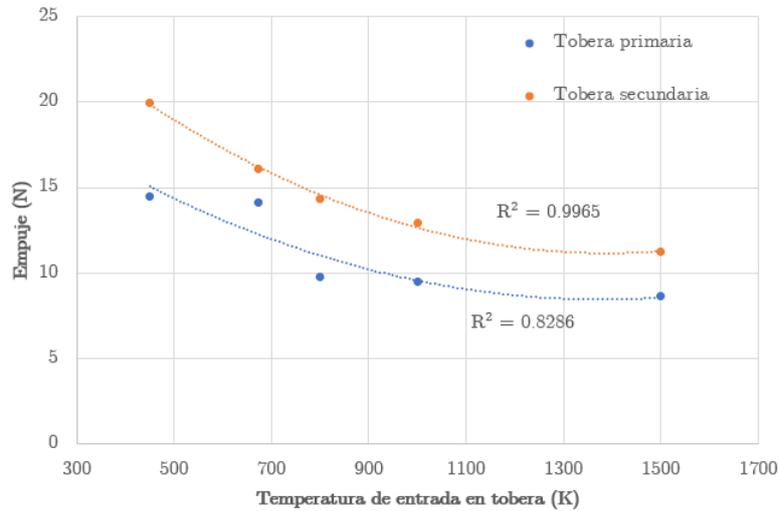


Figura 6.4: Variación del empuje neto con la temperatura de entrada en tobera primaria.

Pese a que los resultados de este análisis indiquen que reducir la temperatura del flujo aumenta la eficiencia de los aumentadores de empuje, así como el empuje neto, debe indicarse que despreciar el término de presión en el cálculo del empuje puede estar detrás de esta aparente incongruencia.

## 6.2 Variación de la geometría del aumentador

### 6.2.1 Definición de parámetros geométricos

En primer lugar, y con el propósito de establecer una nomenclatura unificada a lo largo del estudio, en la Figura 6.5 se muestran las dimensiones de relevancia para proponer los parámetros adimensionales que se variarán durante este análisis. Los diámetros de las secciones de entrada y salida de ambas toberas han sido consideradas, así como las longitudes de cada una de ellas. Teniendo en cuenta estas dimensiones geométricas, los ángulos de divergencia quedan definidos, por lo cual no es necesario incluirlos dentro de los coeficientes adimensionales.

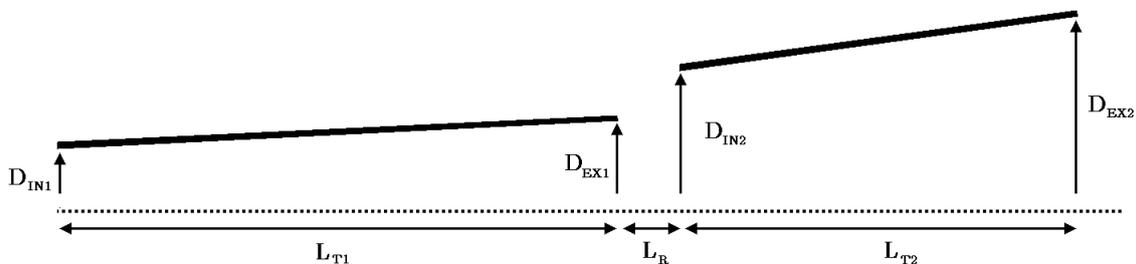


Figura 6.5: Nomenclatura de las dimensiones de la geometría de estudio.

Los parámetros que se consideran durante este estudio son:

- $D_{IN1}$ : Diámetro de entrada de la tobera primaria.
- $D_{EX1}$ : Diámetro de salida de la tobera primaria.
- $D_{IN2}$ : Diámetro de entrada de la tobera secundaria.
- $D_{EX2}$ : Diámetro de salida de la tobera secundaria.
- $L_{T1}$ : Longitud de la tobera primaria.
- $L_R$ : Longitud de la ranura.
- $L_{T2}$ : Longitud de la tobera secundaria.

Para normalizar los valores de empuje obtenidos frente al valor de referencia obtenido en la Sección 3.3.1, no se varía la geometría de la tobera primaria. Por tanto, los valores  $D_{IN1}$ ,  $D_{EX1}$  y  $L_{T1}$  se considerarán constantes durante todo el estudio paramétrico.

Esto deja cuatro parámetros de control y tres impuestos para conformar los coeficientes adimensionales. Se seleccionan de forma que se puedan variar fácilmente manteniendo constantes a los restantes. Vienen dados por:

- $\pi_1 = \frac{A_{EX1}}{A_{IN1}}$ : relación de expansión de la tobera primaria, considerado constante.
- $\pi_2 = \frac{A_{EX2}}{A_{IN2}}$ : relación de expansión de la tobera secundaria.
- $\beta = \frac{A_{IN2}}{A_{EX1}}$ : relación de áreas entre la entrada de la tobera secundaria y la salida de la primaria. Su valor influencia el tamaño de la ranura.
- $\varphi = \frac{L_R}{L_{T1}}$ : longitud adimensional de la ranura respecto a la tobera primaria, considerada constante.
- $\phi = \frac{L_R}{L_{T2}}$ : longitud adimensional de la ranura respecto a la tobera secundaria.
- $\epsilon = \frac{L_{T2}}{L_{T1}}$ : relación de longitudes entre la tobera secundaria y primaria.

Durante las próximas subsecciones, se variarán cuatro parámetros de forma independiente, evaluando su influencia sobre el aumento de empuje producido.

### 6.2.2 Relación de expansión de la tobera secundaria ( $\pi_2$ )

La relación de expansión de la tobera secundaria ( $\pi_2$ ) es el parámetro que relaciona las áreas de salida y entrada de ésta. Puede variarse sencillamente sin alterar el valor de los demás parámetros incrementando o disminuyendo el diámetro de salida en la simulación bidimensional. En la Tabla 6.2 se encuentran las dimensiones de los dos decrementos y aumentos realizados, siendo el diámetro y área referidos a la sección de salida de la tobera secundaria.

	Caso -2	Caso -1	Caso base	Caso +1	Caso +2
<b>Diámetro</b>	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27
<b>Área</b>	0.041	0.045	0.049	0.053	0.057
$\pi_2$	1	1.089	1.182	1.278	1.378

Cuadro 6.2: Variables geométricas del estudio de sensibilidad. Todas las unidades vienen dadas en el Sistema Internacional.

Se tomará como valor de respuesta el aumento de empuje pico producido. En la Figura 6.6 puede visualizarse la variación del aumento de empuje en función del valor de relación de expansión de la tobera secundaria.

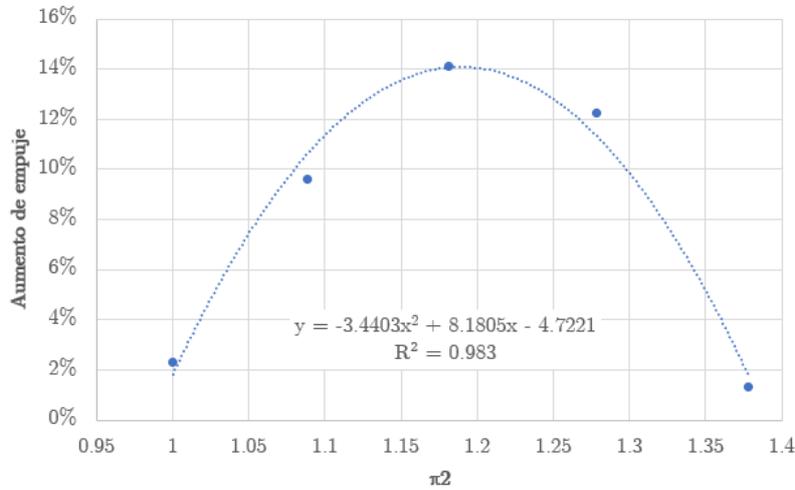


Figura 6.6: Variación de aumento de empuje en función de la relación de expansión de la tobera secundaria.

El valor de  $R^2 = 0,983$  indica que el modelo se ajusta a la interpolación presentada en la figura.

De los resultados arrojados por las sucesivas simulaciones se deduce que, inicialmente el porcentaje de aumento de empuje aumenta con la relación de expansión hasta llegar a un máximo, cercano al caso base estudiado. Posteriormente, este decrece según se supera este máximo.

### 6.2.3 Relación de áreas entre la entrada de la tobera secundaria y la salida de la tobera primaria ( $\beta$ )

Este parámetro adimensional representa la relación entre el área de entrada de la tobera secundaria y la salida de la tobera primaria. Influye directamente sobre el tamaño de la ranura, afectando al rendimiento del aumentador. Para variar este parámetro manteniendo constantes los demás han de ajustarse ambos diámetros de entrada y salida de la tobera secundaria, ajustando para el valor de la relación de expansión secundaria ( $\pi_2$ ).

De nuevo, en la Tabla 6.3 se encuentran los valores de las dimensiones que se modifican durante el estudio, así como el valor de  $\beta$  deseado para cada fase.

	Caso -2	Caso -1	Caso base	Caso +1	Caso +2
$D_{IN_2}$	0.200	0.210	0.230	0.25	0.27
$A_{IN_2}$	0.0314	0.0346	0.0416	0.0491	0.0573
$D_{EX_2}$	0.217	0.228	0.130	0.272	0.294
$A_{EX_2}$	0.0371	0.0409	0.0133	0.0580	0.0677
$\beta$	2.367	2.609	3.130	3.698	4.314

Cuadro 6.3: Valores de relevancia en el estudio. El diámetro de salida de la tobera primaria se considera constante para todos los casos. Se muestran los parámetros geométricos de salida de la tobera secundaria ya que estos se varían para mantener constante la relación de expansión. Todas las unidades vienen dadas en el Sistema Internacional.

Evaluando de nuevo el valor de aumento de empuje pico producido para cada geometría, se obtiene la tendencia mostrada en la gráfica de la Figura 6.7.

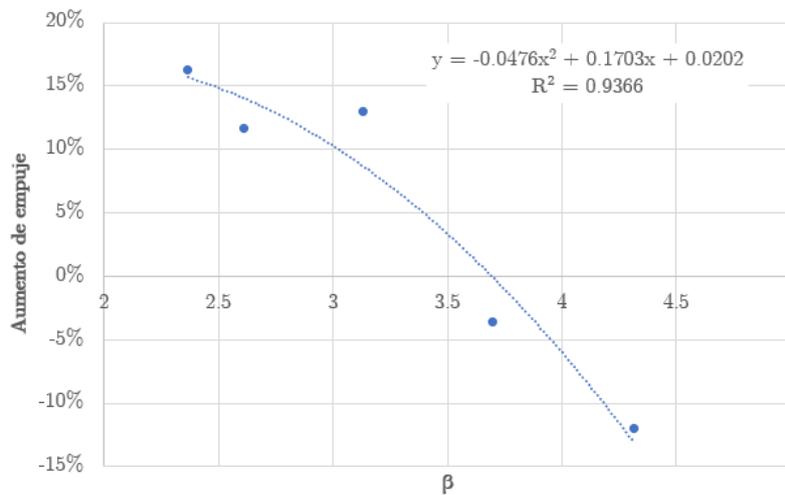


Figura 6.7: Variación de aumento de empuje pico en función de la relación de áreas entre la entrada de la tobera secundaria y la salida de la tobera primaria.

El valor de  $R^2 = 0,9366$  indica que el modelo se ajusta a la interpolación presentada en la figura.

El aumento del parámetro adimensional  $\beta$  produce un aumento de la superficie de entrada de aire de la ranura. Debido a esto el flujo primario requiere de mayor energía para producir la zona de baja presión que acelera el flujo a través de el orificio.

#### 6.2.4 Longitud adimensional de la ranura respecto a la tobera secundaria ( $\phi$ )

Este parámetro relaciona la distancia en dirección axial entre la salida de la tobera primaria y la entrada de la secundaria con la longitud de esta última. Variar su valor afecta a la geometría de entrada de aire de la ranura del dispositivo de empuje, y tiene un efecto determinante en las prestaciones de éste.

Los valores geométricos de control disponibles para modificar su magnitud son las longitudes axiales de la ranura y tobera secundaria. Con el fin de simplificar el estudio y eliminar la posible

dependencia con la relación de longitudes de las toberas ( $\epsilon$ ), sólo se varió la distancia de la ranura. Estos datos se recogen en la Tabla 6.4.

	Caso -2	Caso -1	Caso base	Caso +1	Caso +2
<b>Longitud de ranura</b>	0.010	0.0118	0.0125	0.01325	0.014
$\phi$	0.025	0.029	0.031	0.033	0.035

Cuadro 6.4: Valores geométricos variados durante el estudio. Todas las unidades vienen dadas en el Sistema Internacional.

Evaluando de nuevo el valor de aumento de empuje pico producido para cada geometría, se obtiene la distribución mostrada en la gráfica de la Figura 6.8.

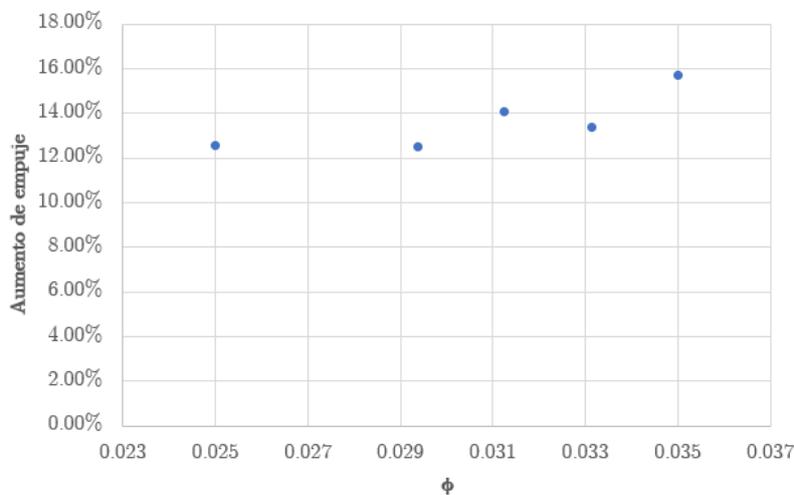


Figura 6.8: Variación de aumento de empuje pico en función de la relación de áreas entre la entrada de la tobera secundaria y la salida de la tobera primaria.

Se observa que el parámetro adimensional estudiado no produce una variación clara de este aumento de empuje, ya que no puede ajustarse a una tendencia definida. Debido a esto, puede concluirse que la variación de la longitud adimensional de la ranura respecto a la tobera secundaria no produce una variación significativa del funcionamiento de los dispositivos aumentadores de empuje dentro del rango estudiado.

Los resultados de este análisis no indican que el rendimiento del dispositivo aumentador sea invariable a longitudes de ranura excesivamente largas o cortas (incluso negativas), sino que la sensibilidad de la variación de empuje respecto a este parámetro es relativamente baja. Puede estudiarse esta influencia en rangos alejados al del estudio, pero se considera irrelevante ya que las caídas de rendimiento en estos valores son inevitables.

### 6.2.5 Relación de longitudes entre las toberas secundaria y primaria ( $\epsilon$ )

En el caso de la relación de longitudes entre ambas toberas, se regula la longitud axial de la tobera secundaria, variada durante el estudio, respecto de la primaria, que se considera fija. Este parámetro reviste una gran relevancia en la aplicación de estos dispositivos, debido a

que una longitud excesiva empeora el grave inconveniente de la resistencia aerodinámica externa.

Para alterar el valor de este parámetro adimensional se aumenta o disminuye la longitud de la tobera secundaria. Esto produce colateralmente una variación del parámetro  $\phi$  analizado previamente, por lo que se debe ajustar la longitud axial de la ranura para mantenerlo constante. Los valores de interés del estudio se recogen en la Tabla 6.5.

	Caso -2	Caso -1	Caso base	Caso +1	Caso +2
$L_{T_2}$	0.300	0.350	0.400	0.450	0.500
$L_R$	0.0094	0.0109	0.0125	0.0141	0.0156
$\epsilon$	0.273	0.318	0.364	0.409	0.455

Cuadro 6.5: Valores geométricos variados durante el estudio. Todas las unidades vienen dadas en el Sistema Internacional.

Evaluando de nuevo el valor de aumento de empuje pico producido para cada geometría, se obtiene la distribución mostrada en la gráfica de la Figura 6.9.

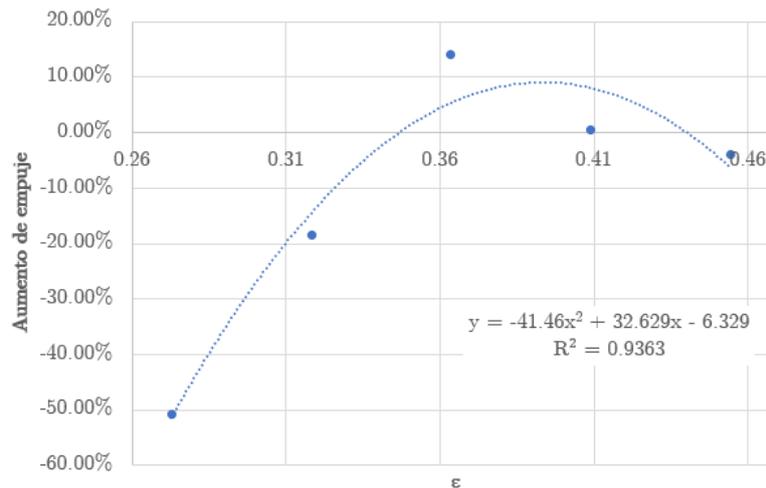


Figura 6.9: Variación de aumento de empuje pico en función de la relación de longitudes entre las toberas secundaria y primaria.

El valor de  $R^2 = 0,9363$  indica que el modelo se ajusta a la interpolación presentada en la figura.

Se observa que a medida que se disminuye la longitud de la tobera secundaria, manteniendo constante la primaria, el valor de aumento de empuje pico disminuye drásticamente. Alrededor del caso base se encuentra el óptimo de esta relación de longitudes, y según se aumenta, el rendimiento del dispositivo disminuye de nuevo.

Puede concluirse, a través de los resultados presentados del análisis, que la longitud axial de la tobera secundaria respecto a la primaria es un parámetro clave en el diseño de los aumentadores de empuje. Queda establecido que el valor óptimo para esta relación se encuentra entre 0,37 y 0,41.



# Capítulo 7

## Conclusiones

Durante el estudio presentado en esta memoria se ha evaluado de forma exitosa el funcionamiento de los dispositivos aumentadores de empuje en motores a reacción del tipo pulsorreactor, cuyo potencial de aplicación ya ha sido validado por empresas aeronáuticas como Boeing [3], mediante técnicas de mecánica de fluidos computacional.

### 7.1 Conclusiones

A continuación se enumeran las conclusiones extraídas de la realización de este trabajo:

- Añadir una tobera secundaria divergente aguas abajo del escape de un pulsorreactor produce un aumento del flujo másico a consecuencia del fenómeno de englobamiento de aire a través de la ranura. Esto se debe al diferencial de presión creado entre la zona de transición entre ambas toberas y el aire en reposo circundante.
- Asimismo, esto produce un descenso en la velocidad de salida de los gases de escape. Esto se debe a la interacción del flujo con las paredes del motor, las pérdidas de energía a lo largo del dominio (invertida en acelerar el flujo en reposo) y la geometría del aumentador.
- Se comprueba que los dispositivos estudiados producen un aumento tanto del empuje pico durante ciclo como del empuje medio durante la fase de expulsión de gases, calculado mediante el producto de la velocidad media y el flujo másico en las secciones de interés.
- Los aumentadores de empuje alargan la fase de generación de empuje en el ciclo de funcionamiento del pulsorreactor, aprovechando la energía residual que se perdería sin dicha tobera secundaria.
- La velocidad de salida en tobera primaria es un parámetro determinante en el valor de aumento de empuje pico, mejorando significativamente su eficiencia según se aumenta dada una geometría de aumentador y tobera fijos. Incrementar esta velocidad constituye un reto de diseño de gran relevancia, pero viene limitada debido a efectos de compresibilidad y construcción.
- No se ha establecido una tendencia clara de la influencia de la temperatura de salida sobre el aumento de empuje pico, debido a la dificultad de incorporar el parámetro de presión sobre la ecuación del empuje. Pese a esto, puede concluirse que aumentar la temperatura de salida en tobera primaria produce un descenso del empuje neto, que converge en altos valores de ésta.

- La relación de expansión de la tobera secundaria ( $\pi_2$ ) es un parámetro clave en la optimización del funcionamiento de los dispositivos aumentadores de empuje. Ésta encuentra una tendencia parabólica con un óptimo alrededor de 1,18 tal y como se ha establecido durante el estudio.
- La relación de áreas entre la entrada de la tobera secundaria y la salida de la primaria ( $\beta$ ) reduce el valor de empuje pico cuando toma valores elevados. Esto se debe a que el aumento de la superficie de entrada de la ranura frena el flujo a su paso, empeorando el rendimiento del aumentador.
- La longitud adimensional de la ranura respecto a la tobera secundaria ( $\phi$ ) no produce una tendencia clara sobre el aumento de empuje pico dentro del rango que ha sido analizado durante el estudio.
- La relación de longitudes entre las toberas secundaria y primaria ( $\epsilon$ ) afecta al aumento de empuje pico, presentando un óptimo alrededor de 0,40 tal y como se ha establecido durante el estudio.
- Simcenter STAR-CCM+ se confirma como una buena alternativa para todas las fases de un estudio de mecánica de fluidos computacional (CFD). Su intuitiva interfaz y potencia facilitan significativamente el proceso de mallado y *setup* del caso frente a otros programas.

## 7.2 Trabajo futuro

Durante esta sección, se presentan diferentes puntos del trabajo realizado que pueden expandirse en futuros estudios, complementando así lo expuesto durante la presente memoria.

- Validar experimentalmente los resultados obtenidos mediante CFD.
- Realizar un estudio de interferencias entre los cuatro parámetros adimensionales expuestos durante el estudio paramétrico.
- Incorporar la resistencia aerodinámica externa del aumentador como parámetro de estudio.

## 7.3 Alineamiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

”Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) u Objetivos Globales son 17 objetivos globales interconectados diseñados para ser un «plan para lograr un futuro mejor y más sostenible para todos». Los ODS fueron establecidos en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (AG-ONU) y se pretende alcanzarlos para 2030” [23].

El presente trabajo puede alinearse con los siguientes puntos:

- Industria, innovación e infraestructura (9): desarrollo de sistemas de aumento de empuje en motores de potencial aplicación en la industria aeronáutica.
- Acción por el clima (13): aumento de la eficiencia de pulsorreactores que permite producir mayor empuje reduciendo el consumo de combustible, y por tanto las emisiones de gases de efecto invernadero como el  $CO_2$ .



# Bibliografía completa

- [1] Wikipedia. *Pulsejet*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pulsejet>. (consultado: 30/07/2022).
- [2] Bruce Simpson. *The Enthusiast's Guide to Pulsejet Engines*. Propia, 2004.
- [3] Wikipedia Commons. *Pulse Ejector Thrust Augmentor*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse\\_Ejector\\_Thrust\\_Augmentor](https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse_Ejector_Thrust_Augmentor). (consultado: 11/05/2023).
- [4] Théo BOUR Félix COUTAND. “Theoretical and experimental investigation of the pulsejet engine. (English)”. En: (2016).
- [5] Ahmed F. El-Sayed. *Fundamentals of Aircraft and Rocket Propulsion*. Springer. Springer, 2016. ISBN: 978-1-4471-6794-5.
- [6] Vijay Anand et al. “Visualization of Valved Pulsejet Combustors and Evidence of Compression Ignition. (English)”. En: *Flow, Turbulence and Combustion* 106 (2021), págs. 901-924. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10494-020-00203-4>.
- [7] Manuel Vidal Vera (Manolo Maravillas). *COMO FABRICAR TU PROPIO PULSORREACTOR DE 90 mm y 7k de empuje*. Scribd, 2011.
- [8] Raymond M Lockwood et al. *PULSE JET ENGINE*. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lockwood-Hiller\\_pulsejet\\_engine.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lockwood-Hiller_pulsejet_engine.png). (consultado: 30/07/2022).
- [9] Wikipedia. *Valveless Pulsejet*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Valveless\\_pulsejet](https://en.wikipedia.org/wiki/Valveless_pulsejet). (consultado: 30/07/2022).
- [10] Viz. GUTMARK ANAND. “A review of pollutants emissions in various pressure gain combustors. (English)”. En: (2019).
- [11] Bruno Ogorelec. *Valveless Pulsejet Engines 1.5*. Propia.
- [12] GIERAS M TRZECIAK A.M. “Temperature estimating method for exhaust gases in valveless pulsejet engine. (English)”. En: *Combustion Engines* 182.3 (2020), págs. 3-9. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-2020-301>.
- [13] Siemens. *Simcenter STAR-CCM+ User Manual*. (consultado: 30/07/2023).
- [14] Wikipedia Commons. *Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds*. URL: [https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones\\_de\\_Navier-Stokes\\_promediadas\\_por\\_Reynolds](https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones_de_Navier-Stokes_promediadas_por_Reynolds). (consultado: 10/06/2023).
- [15] Comsol. *Turbulence Modeling*. URL: [https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.cfd/cfd\\_ug\\_fluidflow\\_single.06.085.html](https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.cfd/cfd_ug_fluidflow_single.06.085.html). (consultado: 10/06/2023).
- [16] Wikipedia Commons. *K-epsilon turbulence model*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon\\_turbulence\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon_turbulence_model). (consultado: 10/06/2023).
- [17] CFD-online.com. *Realisable k-epsilon model*. URL: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Realisable\\_k-epsilon\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/Realisable_k-epsilon_model). (consultado: 10/06/2023).
- [18] University of Washington. *Modelling turbulence*. URL: <https://courses.washington.edu/mengr544/handouts-10/Fluent-k-epsilon.pdf>. (consultado: 10/06/2023).

- [19] Wikipedia Commons. *Número de Courant-Friedrichs-Levy*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Adaptive\\_mesh\\_refinement](https://en.wikipedia.org/wiki/Adaptive_mesh_refinement). (consultado: 10/06/2023).
- [20] Ideal Simulations. *Courant number in CFD simulations*. URL: <https://www.idealsimulations.com/resources/courant-number-cfd/>. (consultado: 14/07/2023).
- [21] Wikipedia Commons. *Número de Courant-Friedrichs-Levy*. URL: [https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_de\\_Courant-Friedrichs-Levy](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Courant-Friedrichs-Levy). (consultado: 14/07/2023).
- [22] Andreia Sofia Moura Melo. “Pulsejet Engine Performance Estimation. (English)”. En: (2019).
- [23] Wikipedia Commons. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. URL: [https://es.wikipedia.org/wiki/Objetivos\\_de Desarrallo Sostenible](https://es.wikipedia.org/wiki/Objetivos_de Desarrallo Sostenible). (consultado: 15/06/2023).
- [24] Consejo de Gobierno UPV. *NORMATIVA DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO Y TRABAJOS DE FIN DE MÁSTER DE LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA*. URL: <https://www.upv.es/entidades/SA/mastersoficiales/U0921722.pdf>. (consultado: 27/06/2023).
- [25] Jefatura del Estado. *Real Decreto 486/1997*. URL: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1997-8669>. (consultado: 27/06/2023).
- [26] Jefatura del Estado. *Real Decreto 488/1997*. URL: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1997-8671>. (consultado: 27/06/2023).
- [27] Jefatura del Estado. *Real Decreto-ley 28/2020*. URL: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-11043>. (consultado: 27/06/2023).

**Parte II**

**Presupuesto**

# Capítulo 8

## Presupuesto

Durante la segunda parte de este documento, se presenta una estimación del coste de la realización de este Trabajo Final de Grado. Estos se dividirán en costes del personal, y equipos y sistemas informáticos.

### 8.1 Costes del personal

Los costes de personal son una parte fundamental del presupuesto para la realización de un Trabajo de Fin de Grado (TFG) sobre Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Estos costes abarcan los gastos asociados a la contratación y compensación de los miembros del equipo que participarán en la ejecución del estudio, que en este caso comprende un ingeniero doctor, tutor del trabajo y un alumno, autor del presente documento. Estos costes se exponen en la Tabla

<b>Personal</b>	<b>Coste (€/h)</b>	<b>Horas</b>	<b>Coste total (€)</b>
<b>Ingeniero doctor</b>	40	40	1.600
<b>Alumno</b>	15	260	3.900
<b>Total</b>			5.500

Cuadro 8.1: Coste del personal

### 8.2 Costes de equipos y sistemas informáticos

En esta sección se detallan los costes de licencias y de amortización de sistemas informáticos. Se asume un tiempo de trabajo anual de 1.760 horas, suponiendo un total de 250 días laborables y una jornada de 8 horas. En la Tabla 8.2 se muestra el cálculo de los costes de amortización, y en la Tabla 8.3 el coste de los equipos y sistemas informáticos de este proyecto.

<b>Elemento</b>	<b>Precio (€)</b>	<b>Vida útil (años)</b>	<b>Coste (€/h)</b>
<b>Ordenador de sobremesa</b>	750	3	0,142
<b>Licencia STAR-CCM+</b>	500	1	0,284
<b>Licencia paquete Office</b>	115	1	0,065

Cuadro 8.2: Cálculo de amortización de sistemas y equipos informáticos

Elemento	Coste (€/h)	Unidades (h)	Coste (€)
Ordenador de sobremesa	0.142	300	42.60
Licencia STAR-CCM+	0.284	125	35.50
Licencia paquete Office	0.065	50	3.25
<b>Total</b>			81.35

Cuadro 8.3: Cálculo de coste de sistemas y equipos informáticos

### 8.3 Coste total

El coste total del proyecto se calcula sumando los costes de personal, y equipos y sistemas informáticos, representado en la Tabla 8.4:

Elemento	Coste (€)
Costes de personal	5500.00
Equipos y sistemas informáticos	81.35
<b>Total</b>	5581.35

Cuadro 8.4: Cálculo de costes totales

El presupuesto total del proyecto asciende al total de **CINCO MIL QUINIENTOS OCHENTA Y UN EUROS Y TREINTA Y CINCO CÉNTIMOS**.

## Parte III

# Pliego de condiciones

## Capítulo 9

# Pliego de condiciones

Durante el presente capítulo se expondrá la normativa vigente de seguridad, higiene y salud que aplican para el desarrollo de los Trabajos de Final de Grado, con el fin de justificar que el trabajo presentado se adapta a todos los puntos de la normativa.

Esta reglamentación debe ser cumplida durante todas las fases del proyecto y por todas las partes involucradas, incluso en el caso de que se realice el trabajo telemáticamente.

### 9.1 Normativa de trabajos de fin de grado de la UPV

Los *Artículos* I de esta normativa [24], presenta el objeto y el ámbito de aplicación de la norma.

El *Artículo* II versa sobre la naturaleza del TFG, exponiendo que este debe de estar dirigido a evaluar las competencias adquiridas durante el grado y que el trabajo debe ser original.

Los *Artículo* III y IV hacen referencia a los tutores, donde exponen entre otras muchas cosas, que es responsabilidad del tutor efectuar un seguimiento del trabajo del alumno. En este caso, el tutor Joaquín de la Morena Borja ha cumplido con todas sus obligaciones y con toda la normativa durante la ejecución del presente trabajo.

El *Artículo* VI expone todo lo referente con los tribunales de calificación.

En el *Artículo* VII se detallan las condiciones que se deben dar para poder matricularse del TFG.

El *Artículo* VIII regula la asignación del TFG. En este caso, se trata de un TFG propuesto por el alumno y avalado posteriormente por las CAT.

Finalmente, encontramos tres artículos más que tratan sobre la defensa, calificación, archivo y custodia de los Trabajos de Final de Grado.

Revisada la normativa, queda determinado que el presente trabajo se ajusta a lo expuesto en la Normativa de trabajos fin de grado de la UPV.

## 9.2 Reales Decretos

Se exponen a continuación los Reales Decretos aplicables al presente trabajo:

### Real Decreto 486/1997

En el Real Decreto 486/1997 [25] se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.

Aplican al presente trabajo los siguientes artículos del mismo:

- **Artículo 1:** Objeto.
- **Artículo 2:** Definiciones.
- **Artículo 5:** Orden, limpieza y mantenimiento. Señalización.
- **Artículo 8:** Iluminación.

El trabajo realizado para la redacción de esta memoria se ha adscrito a todas las obligaciones presentadas en la norma.

### Real Decreto 488/1997

En el Real Decreto 488/1997 [26] se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización.

Aplican al presente trabajo los siguientes artículos del mismo:

- **Artículo 1:** Objeto.
- **Artículo 2:** Definiciones: pantalla de visualización, puesto de trabajo y trabajador.

### Real Decreto-ley 28/2020

En el Real Decreto-ley 28/2020 [27] se establecen las condiciones regulatorias del trabajo a distancia. Dado que el presente trabajo se ha realizado a distancia en su totalidad, esta normativa cobra un carácter fundamental.

Aplican al presente trabajo los siguientes artículos del mismo:

- **Artículo 1:** Ámbito de aplicación.
- **Artículo 2:** Definiciones: trabajo a distancia, teletrabajo y trabajo presencial.
- **Artículo 5:** Igualdad de trato y de oportunidades y no discriminación.
- **Artículo 8:** Voluntariedad del trabajo a distancia y acuerdo de trabajo a distancia.