



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO FIN DE MÁSTER
**INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE
CONTORNO PARA DIFERENTES
GEOMETRÍAS DE EYECTOR INTEGRADOS
EN CICLOS DE REFRIGERACIÓN**

Autor:

García Andrés, Miguel

Tutor:

Vicente Dolz Ruiz

- VALENCIA, 2020-2021 -

Agradecimientos

Agradezco a mi familia el apoyo que me han ofrecido a lo largo de todo este periodo universitario donde ha habido momentos difíciles y siempre he recibido su ayuda sin importar las circunstancias. Agradezco a mis amigos, a todos aquellos que han compartido estos años en la universidad a mi lado y hemos vivido esta aventura juntos, especialmente en estos últimos años de máster, a Juan Diego Marín Re y Juan Martos Bianqui por su inmensurable ayuda y amistad.

Durante la elaboración de este estudio agradezco el compromiso e implicación de mi cotutor Alberto Ponce Mora en todas las fases del proyecto, por su dedicación y responsabilidad, aportando su experiencia y conocimientos sin los que el estudio no hubiese sido posible. Finalmente agradecer la oportunidad que me ha brindado mi tutor Vicente Dolz Ruiz, permitiéndome trabajar en el CMT Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia y mantenerme bajo su tutela y asesoramiento.

Resumen

El presente documento trata el estudio de la influencia de las condiciones de contorno en el funcionamiento de un eyector integrado en ciclos de refrigeración. El proyecto se ha realizado utilizando herramientas de simulación de mecánica de fluidos y sigue todas las fases propias del CFD, desde el diseño y optimización de la geometría, pasando por la generación de la malla y definición de las condiciones de contorno, hasta llegar al postproceso y análisis de los resultados obtenidos.

A lo largo de todo el estudio, se va a trabajar en mejorar las prestaciones del eyector cuando se abandonan las condiciones de contorno mediante el uso de técnicas avanzadas, tales como la modificación de la geometría del eyector empleando mecanismos móviles o modelos de eyector no convencionales para paliar el efecto negativo inducido. Con todo ello se ha fijado como parámetro a optimizar el ratio de arrastre, es decir, la relación entre el gasto másico secundario y el gasto que trasiega la corriente del primario.

En cuanto a las configuraciones de eyector se ha trabajado esencialmente sobre dos de ellas para realizar el estudio de prestaciones. La primera trata el diseño de un eyector que integra una tobera convergente divergente, dotada de una aguja móvil que permite variar la geometría interna del eyector y así, adaptarse a las condiciones externas cambiantes. La segunda de ellas integra en su diseño una tobera aerospike, una configuración empleada en aplicaciones propulsivas en cohetes. Para todas las geometrías se parte de un caso base, con una configuración preliminar y se realiza un barrido de condiciones de contorno cambiantes que va a permitir caracterizar el funcionamiento del eyector con la obtención de sus mapas de funcionamiento.

El estudio de diferentes configuraciones va a permitir realizar una comparación entre ellas y llegar a una solución que establezca un compromiso entre complejidad mecánica del eyector y eficiencia.

Abstract

This document deals the study of the influence of the boundary conditions on the operation of an integrated ejector in refrigeration cycles. The project has been carried out using computational fluid dynamics tools and follows all the phases of this technology, the design and optimization of the geometry, the generation of the mesh and definition of the boundary conditions and finally the post-processing and analysis of the obtained results.

Throughout the study, work will be done on improving the ejector performance off-design by using advanced techniques, such as modifying the ejector geometry using mobile mechanisms or non-conventional ejector models to alleviate the negative effect induced. The entrainment ratio has been set as a parameter to optimize, that is, the relationship between the secondary mass flow rate and the flow rate transferred by the primary flow.

Regarding the ejector configurations, essentially two of them have been worked on to carry out the performance study. The first deals with the design of an ejector that integrates a divergent convergent nozzle, equipped with a movable spindle that allows the internal geometry of the ejector to be varied and adapted to changing external conditions. The second one integrates in its design an aerospoke nozzle, a configuration used in supersonic applications. For all geometries, we start from a base case, with a preliminary ejector configuration and a scan of changing contour conditions is carried out that will allow characterizing the operation of the ejector by obtaining its operating maps.

The study of different configurations will allow to make a comparison between them and reach a solution that establishes a compromise between mechanical complexity of the ejector and efficiency.

Índice general

Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XI
I Memoria	1
1. Definición del proyecto	3
1.1. Motivación del proyecto	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Antecedentes	4
1.4. Estructura del proyecto	6
1.4.1. Parte I: Memoria	6
1.4.2. Parte II: Anexos	7
2. Fundamentos teóricos	9
2.1. Funcionamiento de un eyector	9
2.2. Ciclo de eyección	12
2.3. Tipos de toberas	17
2.4. Tobera convergente-divergente	17
2.4.1. Ondas de choque	20
2.5. Tobera Aerospike	26

2.6.	Parámetros característicos de un sistema de refrigeración por eyección	30
2.7.	Aplicaciones de los eyectores en sistemas de refrigeración	31
2.8.	Fluido de trabajo. Refrigerantes	32
2.8.1.	Tipos de refrigerantes	33
2.8.2.	Identificación de los refrigerantes	34
2.8.3.	Refrigerante R-600a. Isobutano	35
3.	Modelado CFD	39
3.1.	Teoría de la mecánica de fluidos computacional	39
3.1.1.	Preproceso	41
3.1.2.	Solver	51
3.1.3.	Postprocesado	53
4.	Generación y simulación de la geometría de referencia	55
4.1.	Generación de la geometría	55
4.1.1.	Eyector de geometría variable	55
4.1.2.	Eyector aerospike	57
4.2.	Mallado	59
4.3.	Configuración de la simulación	63
4.3.1.	Configuración del caso	63
4.3.2.	Condiciones de contorno	63
4.3.3.	Fluido de trabajo	64
4.3.4.	Modelo de turbulencia	65
4.3.5.	Solver y factores de relajación	65
4.3.6.	Automatización del proceso	66
5.	Estudio del funcionamiento del eyector de geometría variable	69
5.1.	Optimización geométrica	69

5.2. Respuesta fuera de las condiciones de diseño	71
6. Estudio del funcionamiento del eyector aerospike y comparativa entre configuraciones	81
6.1. Respuesta fuera de las condiciones de diseño	81
7. Conclusiones y proyección futura	89
8. Presupuesto	93
Bibliografía	97
II Anexos	99
9. Resultados	101
9.1. Tablas de resultados	101
9.2. Gráficas de funcionamiento del eyector	102
10. Pliego de condiciones	107

Índice de figuras

1.1. CMT-Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia [1].	5
1.2. Organigrama del CMT-Motores Térmicos [2].	5
2.1. Geometría típica de un eyector.	10
2.2. Modos de operación de un eyector subsónico	11
2.3. Modos de operación de un eyector supersónico	12
2.4. Ciclo de refrigeración por eyección.	13
2.5. Diagrama Temperatura-Entropía ciclo de refrigeración por eyección.	15
2.6. Tobera convergente-divergente.	18
2.7. Regímenes de funcionamiento para una tobera convergente-divergente.	19
2.8. Onda de choque normal.	22
2.9. Onda de choque oblicua.	24
2.10. Onda de choque Prandtl-Meyer.	26
2.11. Regímenes de funcionamiento para una tobera aerospike [3].	28
2.12. Comparativa del impulso específico desarrollado por una tobera aerospike de perfil completo, truncado y una tobera convencional [3].	30
2.13. Sistema de refrigeración por eyección con colector solar.	32
2.14. Ejemplo de identificación de los refrigerantes, R1234yf.	35
2.15. Gráfico Presión de vapor-Temperatura para el R-600a [4].	36
3.1. Pasos seguidos en la simulación de un problema mediante CFD. Preproceso , solver , postproceso	40

3.2. Malla estructurada (izquierda) vs Malla no estructurada (derecha) [5].	42
3.3. Malla conforme (izquierda) vs Malla no conforme (derecha) [6].	43
3.4. Cascada de energía para un flujo turbulento.	46
4.1. Plano del eyector de geometría variable para el caso base. Nota: todas las cotas están expresadas en milímetros.	56
4.2. Cotas críticas para la prestación del eyector. D_1 : diámetro de la salida de la tobera principal, D_2 : diámetro del conducto de mezcla, L_1 : longitud de la cámara de succión.	57
4.3. Plano del eyector aerospike para el caso base. Nota: todas las cotas están expresadas en milímetros.	58
4.4. Secciones en los que se ha dividido el dominio de control del eyector para realizar la malla estructurada.	60
4.5. Malla eyector geometría variable.	62
4.6. Malla eyector aerospike.	62
4.7. Fronteras definidas para el eyector de geometría variable y aerospike. Leyenda de colores: inlet , axis , outlet , wall.	63
4.8. Nodos Dell Power R640 en el cluster de cálculo Rigel.	67
5.1. Mapa de contorno de ratio de arrastre en función de la longitud del diámetro del conducto de mezcla y el diámetro de la salida de la tobera principal para una longitud de la cámara de succión de 3.5 mm.	70
5.2. Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida para un área de garganta de $1.66mm^2$	72
5.3. Contornos de presión del eyector de geometría variable. Imagen superior: $P_{out} = 5.038 bar$; Imagen central: $P_{out} = 5.338 bar$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.538 bar$	73
5.4. Vectores de velocidad para una $P_{out} = 5.538 bar$ del eyector de geometría variable.	74
5.5. Contornos de Mach del eyector de geometría variable. Imagen superior: $P_{out} = 5.038 bar$; Imagen central: $P_{out} = 5.338 bar$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.538 bar$	75

5.6. Contornos de temperatura del eyector de geometría variable. Imagen superior: $P_{out} = 5.038 \text{ bar}$; Imagen central: $P_{out} = 5.338 \text{ bar}$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.538 \text{ bar}$	76
5.7. Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida y variando la posición de la aguja. . . .	77
5.8. Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida para diferentes temperaturas a la entrada del conducto principal del eyector.	78
5.9. Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la entrada del conducto secundario del eyector. .	79
6.1. Ratio de arrastre del eyector aerospike en función de la variación de la presión a la salida.	82
6.2. Contornos de presión del eyector aerospike. Imagen superior: $P_{out} = 4.838 \text{ bar}$; Imagen central: $P_{out} = 5.038 \text{ bar}$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.438 \text{ bar}$	83
6.3. Contornos de Mach del eyector aerospike. Imagen superior: $P_{out} = 4.838 \text{ bar}$; Imagen central: $P_{out} = 5.038 \text{ bar}$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.438 \text{ bar}$	84
6.4. Vectores de velocidad para una $P_{out} = 5.438 \text{ bar}$ del eyector aerospike. .	85
6.5. Contornos de temperatura del eyector aerospike. Imagen superior: $P_{out} = 4.838 \text{ bar}$; Imagen central: $P_{out} = 5.038 \text{ bar}$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.438 \text{ bar}$	86
6.6. Ratio de arrastre del eyector aerospike en función de la variación de la presión a la salida para diferentes temperaturas a la entrada del conducto principal del eyector.	87
6.7. Ratio de arrastre del eyector aerospike en función de la variación de la presión a la entrada del conducto secundario.	88
9.1. Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida y variando la posición de la aguja. Temperatura 68°C	102
9.2. Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida y variando la posición de la aguja. Temperatura 73°C	103
9.3. Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida y variando la posición de la aguja. Temperatura 83°C	104

9.4. Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida y variando la posición de la aguja. Temperatura 88°C.	105
---	-----

Índice de tablas

2.1. Niveles de inflamabilidad y toxicidad para los refrigerantes según la Norma 34 de ASHRAE.	37
2.2. Propiedades del refrigerante isobutano R-600a.	37
4.1. Parámetros característicos de la malla para el eyector de geometría variable y aerospike. Nota: cada uno de los parámetros expresa el promedio en todos los elementos de la malla	61
4.2. Condiciones de contorno que definen el problema de flujo para ambas configuraciones de eyector.	64
4.3. Controles para asegurar la convergencia del caso.	65
5.1. Cotas para la geometría óptima del eyector de geometría variable.	71
8.1. Presupuesto del equipo empleado para la realización del proyecto.	94
8.2. Presupuesto de las horas de uso del equipo	94
8.3. Presupuesto del cluster de cálculo.	94
8.4. Presupuesto destinado a las horas de ingeniero dedicadas para cada actividad.	95
8.5. Presupuesto de las horas dedicadas por el doctor encargado.	95
8.6. Total bruto del presupuesto invertido.	96
8.7. Total neto del presupuesto invertido.	96
9.1. Datos del mapa de contorno del ratio de arrastre en función de las cotas del diámetro a la salida de la tobera principal y del diámetro del conducto de mezcla	101

9.2. Condiciones de contorno que definen el problema de flujo para ambas configuraciones de eyector.	102
9.3. Condiciones de contorno que definen el problema de flujo para ambas configuraciones de eyector.	103
9.4. Condiciones de contorno que definen el problema de flujo para ambas configuraciones de eyector.	104
9.5. Condiciones de contorno que definen el problema de flujo para ambas configuraciones de eyector.	105

Parte I
Memoria

Capítulo 1

Definición del proyecto

1.1. Motivación del proyecto

El constante desarrollo de la industria y el incremento de la población mundial acomodada a unos estándares de vida cada vez más elevados y exigentes han producido un aumento en la demanda energética y consecuentemente, un aumento de precios además de agudizar la evidente problemática ambiental. Esta situación ha forzado el estudio sobre nuevas alternativas que permitan utilizar fuentes de energía renovables y que permitan reducir el consumo.

En el campo de la refrigeración, la instalación de eyectores en sistemas de aire acondicionado está en fase de investigación y evolución para llegar a convertirse en una de las tecnologías capaces de aprovechar multitud de fuentes de energía, ya sea del calor residual de los gases de escape en una industria, el calor producido por la combustión de motores en automoción o el calor recogido en colectores solares. Entre sus méritos más remarcables cabe destacar su gran simplicidad mecánica exenta de partes móviles (en sus configuraciones más simples) que los diferencian de los compresores y bombas que sustituye, con lo que se consiguen sistemas libres de vibración, además de presentar costes de mantenimiento mínimos y su aptitud para funcionar con refrigerantes de bajo impacto ambiental. Sus posibilidades son infinitas (acondicionamiento de salas de uso doméstico, automóviles, cabinas de avión, cámaras para la conservación de alimentos, etc) y se encuentran en plena fase de estudio.

La principal problemática de la tecnología de eyectores aplicada a los sistemas de refrigeración, es la gran pérdida de eficiencia en el ciclo cuando las condiciones de contorno para las que ha sido diseñado el eyector cambian ligeramente. Esto supone un gran inconveniente, pues los regímenes de funcionamiento de los motores de combustión interna alternativos, como los turbojets y turbofans empleados en aviación, así como las condiciones climáticas en aplicaciones domésticas son muy variables y repercuten negativamente en el funcionamiento del eyector.

1.2. Objetivos

Con tal de solucionar la pérdida de prestaciones descrita en líneas anteriores se fijan como objetivos explorar diferentes configuraciones de eyector, entre ellas la configuración de tobera de geometría variable, dotada de una aguja móvil que permite ajustar la estructura interna del eyector según las condiciones de trabajo. Esta opción constituye una opción muy flexible y adaptativa, pero a su vez implica una complejidad mecánica extra. Por esta razón se estudian otras configuraciones del eyector, como el uso de una tobera aerospike, con el fin de establecer una comparación entre ambas, determinar sus beneficios y concluir en que casos es más conveniente el uso de cada una de ellas.

Por otro lado, se pretende realizar un estudio paramétrico para optimizar la geometría del eyector sobre las que se va a trabajar y caracterizar al máximo su funcionamiento, es decir, realizar simulaciones CFD para ambas configuraciones en las que se van modificar las condiciones de contorno que gobiernan el problema y estudiar el comportamiento de los eyectores cuando se abandona su punto de diseño. Las condiciones de trabajo que se van a simular van a ser las propias a las de una instalación de refrigeración doméstica mediante colector solar.

Con los resultados obtenidos en las simulaciones de flujo se podrán obtener mapas de contorno de variables de interés y estudiar el comportamiento del flujo en el eyector, además de determinar las prestaciones del mismo, representadas por el ratio de arrastre (*omega*) que se define como la relación entre el gasto másico que trasiega por el conducto secundario y el gasto que trasiega por el primario.

1.3. Antecedentes

La realización de este Trabajo Fin de Máster transcurre a lo largo del curso 2020-2021 en la línea de Renovación de la Carga del CMT-Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia.

El CMT-Motores Térmicos [7] es un centro de investigación y formación plenamente involucrado en la I+D de la Ciencia Termofluidodinámica Aplicada con más de 40 años de historia. Durante este tiempo el centro ha trabajado esencialmente en estudios aplicados en la optimización del comportamiento de sistemas industriales y promoviendo su desarrollo, además de la investigación básica para comprender mejor los procesos físicos relevantes involucrados. Sus actividades se centran en la industria automotriz, aeroespacial, ferroviaria y marina, donde su profundo conocimiento científico se emplea en la combinación de pruebas experimentales en instalaciones de última generación y estudios teóricos asistidos por CFD para la obtención de resultados técnicos y científicos relevantes.



Figura 1.1: CMT-Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia [1].

Actualmente el CMT-Motores Térmicos trabaja con un amplio abanico de empresas como Renault, RENFE, Ferrari, Toyota, Ford, entre otras, y su organización interna responde a la estructura que aparece representada en la Figura 1.2:

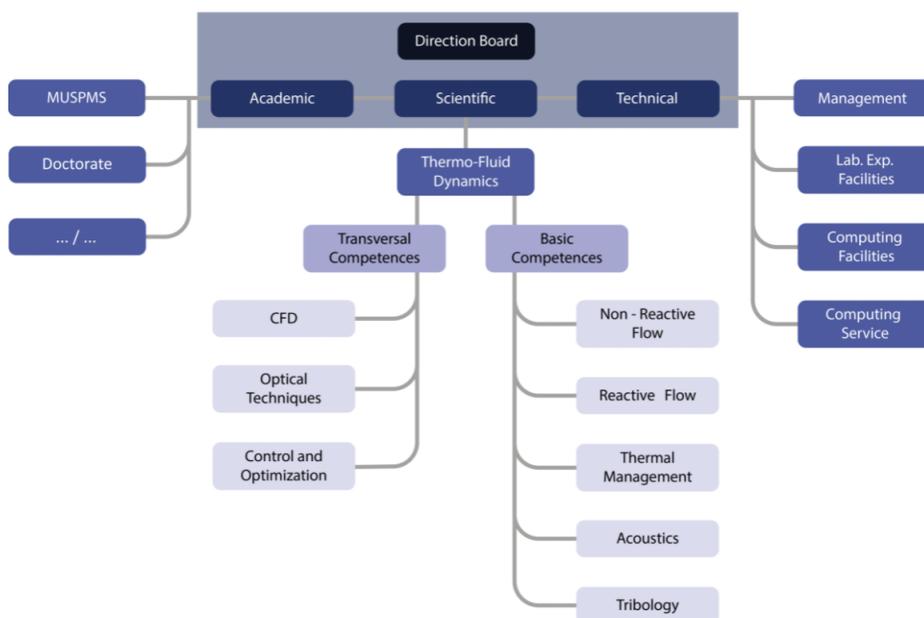


Figura 1.2: Organigrama del CMT-Motores Térmicos [2].

El TFM se enmarca dentro del proyecto de instalaciones para el aprovechamiento de la energía solar para refrigeración y sigue la línea del Trabajo de Final de Máster de Alberto Ponce Mora, cotutor del documento presente y en el que se trataba la determinación de los parámetros geométricos más influyentes en el funcionamiento del eyector, así como la optimización de la geometría del mismo para adaptarse a las condiciones operacionales de un automóvil.

1.4. Estructura del proyecto

1.4.1. Parte I: Memoria

La primera parte corresponde a la memoria, que constituye el grueso del documento. Es en esta parte donde se van a tratar todos los aspectos teóricos sobre la tecnología de eyectores aplicada a sistemas de refrigeración y todo el estudio realizado en simulaciones de flujo CFD para caracterizar el funcionamiento del eyector fuera de sus condiciones de diseño. Con ello se persigue poder establecer una comparativa entre ambas configuraciones de eyector tratadas y fundar una conclusión para la tecnología y su futuro en el campo de sistemas de refrigeración doméstica por colector solar.

El guión que sigue la memoria es el que se muestra en las siguientes líneas:

El segundo capítulo *Fundamentos teóricos* trata el funcionamiento de un ciclo de eyección para aire acondicionado y todos los fundamentos teóricos sobre los eyectores, definiendo sus parámetros característicos, partes y aplicaciones. Por otro lado se dan a conocer los fluidos de trabajo (refrigerantes), cada vez más comprometidos en el medio ambiente. Finalmente se estudian todas las configuraciones de eyector que se van a analizar y sobre las que se va a construir el proyecto profundizando en las particularidades de cada una de ellas.

El tercer capítulo *Modelado CFD* comprende los fundamentos de la teoría de mecánica de fluidos computacional. En él se explica el proceso CFD seguido, considerando el preproceso que abarca a su vez la definición del dominio de trabajo, mallado, modelos de turbulencia y fijación de condiciones de contorno, además del solver y postproceso de los datos obtenidos.

En el cuarto capítulo *Generación y simulación de la geometría de referencia* se trata todo el proceso común llevado a cabo para definir el caso base para ambas geometrías. En este capítulo se profundiza en las geometrías del eyector, proceso de mallado de dichas geometrías para poder definir una malla estructurada y establecimiento de las condiciones de contorno, además de los modelos de turbulencia empleados para la resolución del caso.

En el quinto capítulo *Estudio del funcionamiento del eyector de geometría variable* se presenta el estudio del funcionamiento del eyector de geometría variable. En este análisis se realiza una optimización de la geometría del caso base planteado con anterioridad y se modifican las condiciones de contorno para analizar el funcionamiento del eyector fuera de su punto de diseño, tratando de caracterizar al máximo la configuración de geometría variable.

En el sexto capítulo *Estudio del funcionamiento del eyector aerospike y comparativa entre configuraciones* se ha realizado un estudio análogo al realizado para el eyector de geometría variable, pero en este caso para la configuración aerospike. A diferencia de la anterior, la geometría del eyector no ha sido optimizada, simplemente se ha comprobado

que era adecuada para realizar el estudio de prestaciones. A su vez, en este capítulo se establecerá la comparativa entre los resultados obtenidos para el eyector de geometría variable y el aerospike.

En el séptimo capítulo *Conclusiones y proyección futura* se presentan las conclusiones del estudio, con un balance de las ventajas e inconvenientes que presenta cada una de las configuraciones de eyector. Por otro lado, se elabora una predicción de la evolución de la tecnología en el mercado, así como aplicaciones en las que la tecnología de eyectores va a poder ser competitiva.

En el octavo y último capítulo *Presupuesto* se presenta el presupuesto del estudio realizado, diferenciando los sectores que comprenden la totalidad de la inversión.

1.4.2. Parte II: Anexos

En esta última parte se adjuntan las tablas que contienen datos poco relevantes para el estudio, pero que ha sido necesaria su elaboración para ordenarlos datos y/o obtener las gráficas presentadas en el apartado de resultados. Además, se añaden otras gráficas que no aportan información complementaria al estudio y en las que se muestra la evolución de las prestaciones del eyector para otras condiciones de contorno. Finalmente se adjunta el pliego de condiciones.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1. Funcionamiento de un eyector

Un eyector, también conocido como inyector, bomba de chorro o termo-compresor, no es más que un dispositivo en el que por su interior circula una corriente de flujo primaria a través de una tobera que la acelera y expande y a la que se incorpora una corriente secundaria que ingresa desde una cámara de succión. Ambos flujos se mezclan en la cámara de mezcla y un difusor comprime el chorro resultante con una recuperación parcial de la presión.

Cuando se habla de corriente '*primaria*' se está refiriendo al flujo que proviene del generador y que va a servir como energizante, mientras que el término referido a la corriente '*secundaria*' se refiere al flujo que va a ser impulsado, pasivo o energizado. La estructura interna del flujo es complicada, sobretodo en los eyectores supersónicos, debido a que se deben considerar fenómenos de compresibilidad, las interacciones de las ondas de choque, la mezcla turbulenta de corrientes y, en ciertas aplicaciones, un flujo de trabajo bifásico en algunas etapas. Por esta razón los estudios del comportamiento del flujo en el interior del eyector se realizan mediante técnicas e instrumental óptico y CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

La estructura del eyector se basa en cuatro partes fácilmente distinguibles: la tobera principal, la cámara de succión, la cámara de mezcla y el difusor final. Se pasa a estudiar en detalle que ocurre en cada una de estas zonas, Figura 2.1.

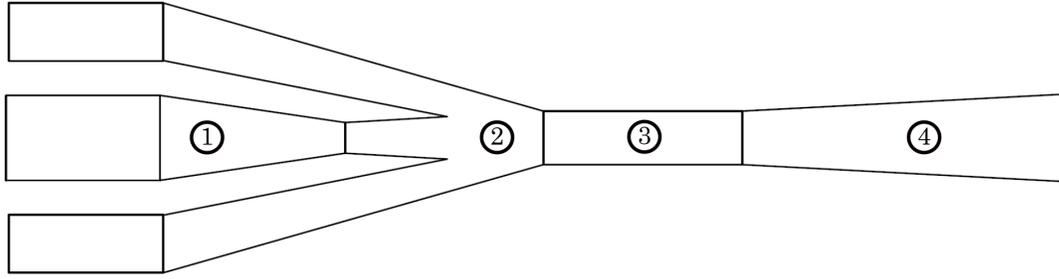


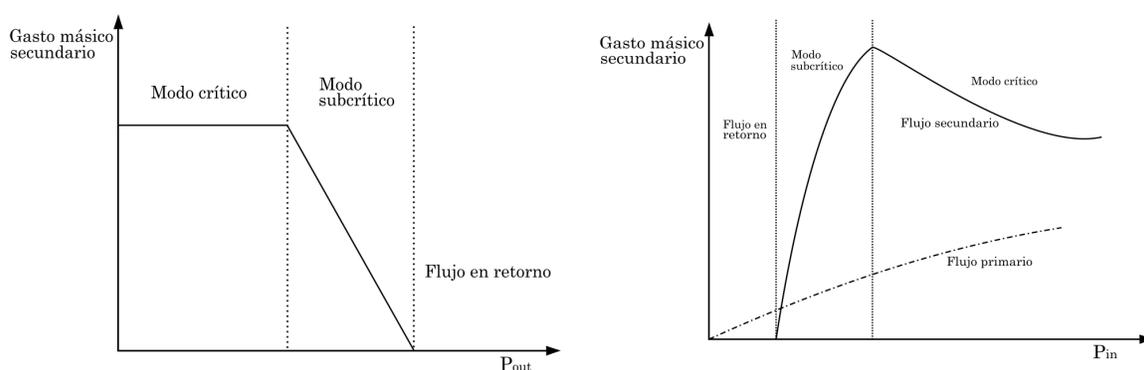
Figura 2.1: Geometría típica de un eyector.

- **Tobera principal** ①: el flujo primario entra en un tobera convergente-divergente, usualmente, reduciendo su presión y acelerándose en la parte convergente hasta llegar a la garganta, donde se alcanza velocidad sónica. En la parte divergente de la tobera la velocidad del flujo sigue incrementándose hasta velocidades supersónicas y la presión disminuye según las leyes de conservación. Con ello se obtiene una región de baja presión a la salida de la tobera.
- **Cámara de succión** ②: se trata de la cámara aguas abajo de la tobera principal, donde se establece una diferencia de presión entre el flujo secundario y la propia de la cámara de succión, induciendo a la corriente secundaria a penetrar en el interior del eyector.
- **Cámara de mezcla** ③: con el primer contacto, el flujo primario y secundario no se mezclan y transcurren a través de un tramo convergente de longitud relativamente corto y que actúa como una tobera convergente para el flujo secundario. A lo largo de esta zona descrita el flujo secundario alcanza velocidad sónica. Aguas abajo ambos flujos, primario y secundario, empiezan a mezclarse en la cámara de mezcla hasta terminar con la misma velocidad y presión. Con regímenes supersónicos en la cámara de mezcla, se forman ondas de choque provocando la compresión del flujo y aguas abajo la velocidad de la corriente va decreciendo hasta llegar a un régimen subsónico.
- **Difusor** ④: La mezcla pasa a través de la última zona, un conducto divergente, donde se convierte la energía cinética en energía de presión, produciéndose una disminución de la velocidad y una recuperación parcial de la presión.

Por otro lado, cabe mencionar que existen diferencias [8] en la forma de operar de los eyectores que trabajan con velocidades subsónicas y los que trabajan con velocidades supersónicas, pues tanto los eyectores subsónicos como supersónicos pueden trabajar en distintos regímenes de funcionamiento. A continuación se explican los distintos modos de operación para ambos eyectores, profundizando en los eyectores supersónicos.

Eyectores subsónicos

Los eyectores subsónicos pueden trabajar en tres diferentes modos, tal y como se muestra en la Figura 2.2. En el modo crítico, el flujo primario se encuentra "chocado" y el flujo secundario permanece constante. En el modo subcrítico el flujo primario no está chocado y la dependencia del gasto másico del flujo secundario con la contrapresión de salida se acentúa. En el modo de mal funcionamiento o flujo en retorno la corriente del secundario circula en dirección contraria a la deseada, con lo que el eyector no realiza su misión. En este último caso los efectos negativos se pueden extender aguas abajo y arriba del eyector, llegando a producir grandes desperfectos en el conjunto de la instalación.



(a) Fijando la presión del flujo primario (P_{in}). (b) Fijando la contrapresión a la salida (P_{out}).

Figura 2.2: Modos de operación de un eyector subsónico

Cuando se refiere al flujo como "chocado" [9] se corresponde a un fenómeno que ocurre bajo condiciones específicas. El flujo inicial con una cierta presión pasa a través de una restricción bajando su presión y alcanzando la velocidad del sonido, con lo que el flujo másico del fluido se vuelve irrelevante para la presión de la corriente descendente, es decir, el flujo másico permanece constante incluso cuando la presión aguas abajo disminuye aún más. En un eyector este fenómeno se produce en dos zonas: en el flujo primario cuanto circula a través de la tobera principal y en la cámara de mezcla como consecuencia de la aceleración del flujo secundario que se encuentra inicialmente en un estado de baja velocidad hasta un régimen supersónico.

Eyectores supersónicos

Como los eyectores subsónicos, los supersónicos pueden trabajar en tres modos distintos, Figura 2.3. En el modo crítico, conocido como "doble choque", el ratio de arrastre es constante como consecuencia del choque de ambas corrientes, primaria y secundaria. En el modo subcrítico solamente el flujo primario se encuentra chocado, por lo que el ratio de arrastre presenta una relación lineal con la variación de la contrapresión a la

salida. Finalmente en el modo de mal funcionamiento, la corriente del secundario pasa a circular en sentido reverso produciendo un funcionamiento defectuoso, y que en el peor de los casos puede producir el deterioro de componentes de la instalación.

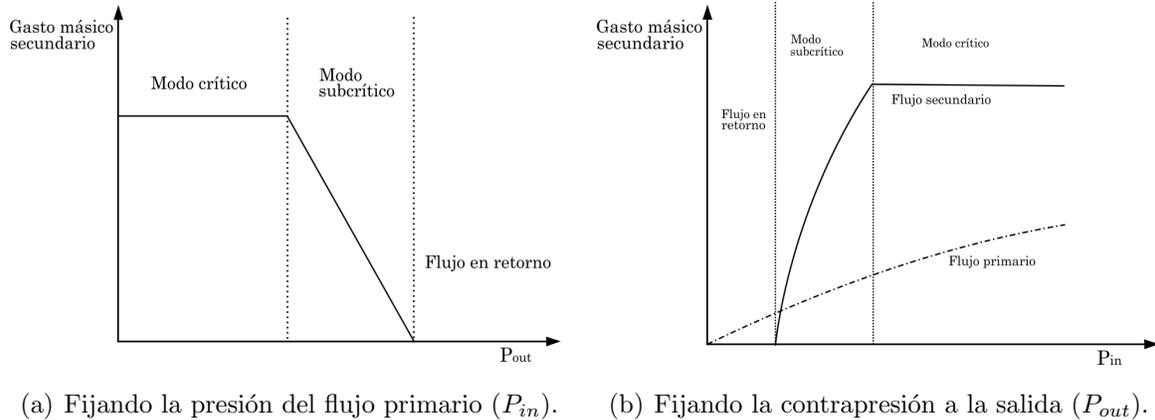


Figura 2.3: Modos de operación de un eyector supersónico

Cabe destacar en los eyectores supersónicos que el choque del flujo secundario en el modo crítico es de gran importancia, pues limita el máximo ratio de arrastre y, por otro lado, la capacidad de refrigeración y el COP van a permanecer constante. Las ondas expansivas del flujo primario, producidas como consecuencia de la expansión insuficiente, crean un conducto convergente donde no se produce mezcla de corrientes. El flujo arrastrado percibe la constricción de la sección, alcanzando velocidad sónica y entrando en choque, donde sus características van a depender de las condiciones de funcionamiento. Esto se traduce en que el flujo másico de la corriente secundaria no depende en su totalidad de la contrapresión a la salida, y que depende en gran parte de la presión aguas arriba. En cambio, durante el modo subcrítico, el buen funcionamiento de los eyectores se encuentra influenciado, en su mayoría, por la contrapresión aguas abajo. Cuando se aumenta la presión a la salida, la onda de choque en la cámara de mezcla se mueve a lo largo del conducto e interactúa con el proceso de mezcla, con ello se incrementa la contrapresión aún más y el flujo secundario circula en la cámara de succión en sentido contrario.

2.2. Ciclo de eyección

Actualmente los sistemas de aclimatación se encuentran presentes en infinidad de aplicaciones, desde su utilización para garantizar la comodidad en espacios públicos o en vehículos, hasta en calefacción de hogares y aire acondicionado. Todo ello está conllevando un aumento del consumo energético, por lo que muchas compañías están invirtiendo en nuevas tecnologías que permitan reducirlo y aprovechar la energía residual de muchos procesos para llegar a una solución que resulte atractiva y que suponga un ahorro

energético notable.

Los sistemas de eyección para refrigeración se encuentran en la línea de convertirse en una de las principales soluciones para reducir dicho consumo energético, aunque todavía en primeras fases de desarrollo, permitiendo su instalación en sistemas que aprovechen el calor residual de la combustión e incluso llegándose a utilizar en bombas de calor de uso doméstico cuya principal fuente de energía es la solar, siendo esta última aplicación la estudiada y desarrollada a lo largo del proyecto al tratarse de una alternativa atractiva en la creciente demanda de energías renovables que permiten establecer un compromiso entre prestaciones y bajo impacto ambiental.

La configuración básica de un sistema de refrigeración mediante eyección es la mostrada en la Figura 2.4, donde los principales elementos que la conforman son el generador, el condensador, el evaporador, la bomba y el propio eyector.

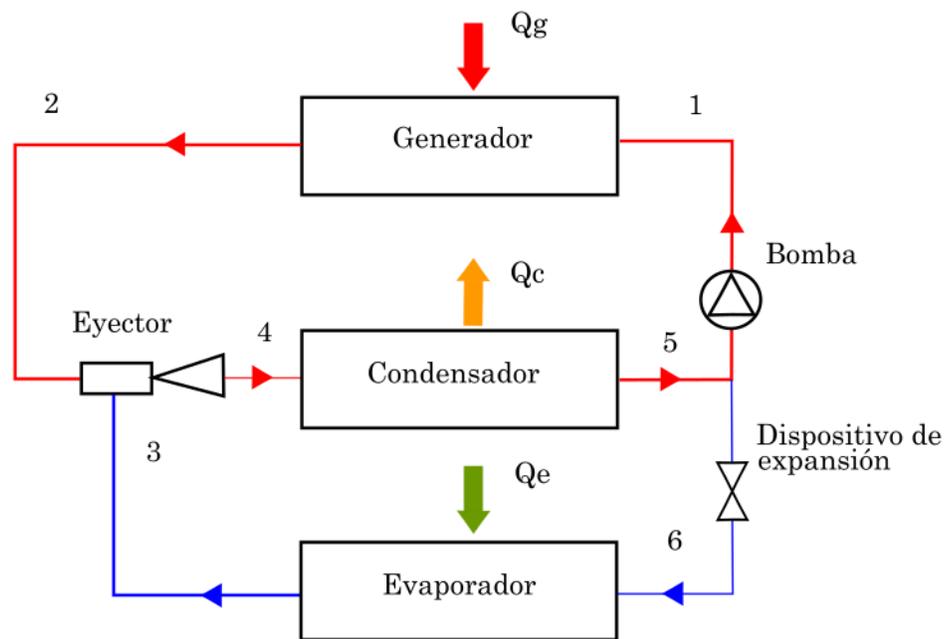


Figura 2.4: Ciclo de refrigeración por eyección.

En primer lugar, cabe destacar que en el ciclo se diferencian dos lazos: el primero de ellos corresponde al lazo de potencia y se muestra en la Figura 2.4 resaltado en color rojo, y en segundo lugar, el lazo de refrigeración resaltado en color azul. El proceso se inicia en la bomba que impulsa el líquido refrigerante hasta llegar al generador donde se produce el intercambio de energía con la fuente de calor a alta presión y temperatura (estación 1). El refrigerante abandona el generador en forma de vapor y entra al eyector (estación 2) constituyendo la corriente principal del mismo. Una vez entra en el eyector el flujo se acelera por la acción de la tobera convergente-divergente hasta velocidades superiores a las de sonido. A su vez la corriente principal proveniente del generador tras

expandirse, favorece el arrastre de la corriente secundaria a baja presión aguas abajo de la tobera. Las dos corrientes se mezclan en el interior del eyector en el conducto de mezcla (estación 3) donde se produce una reducción de la presión como consecuencia de la expansión, favoreciendo de esta forma la mezcla entre ambas. Aguas abajo, en la zona divergente final del eyector, el flujo proveniente de ambos conductos, ya mezclado, se decelera y aumenta su presión parcialmente. Siguiendo con su recorrido la mezcla sale del eyector y se dirige al condensador (estación 4). En el condensador la mezcla pasa a estado líquido y lo abandona (estación 5) para dirigirse parte de él nuevamente a la bomba inicial y generador completando así el lazo de potencia, y el restante se desvía hacia el lazo de refrigeración, donde habitualmente se expande mediante un conducto convergente antes de entrar al evaporador (estación 6). El fluido entra al evaporador en un estado líquido y a una temperatura inferior al elemento a refrigerar, generalmente una habitación cerrada, produciéndose un intercambio de calor entre ambos, cediéndose calor de la habitación al fluido de trabajo. El fluido que abandona el evaporador se dirige al eyector a través de la entrada secundaria al mismo para mezclarse nuevamente con la corriente principal proveniente del generador.

Para ayudar con la comprensión del funcionamiento del ciclo se muestra en la Figura 2.5 una gráfica que relaciona la temperatura con la entropía para cada uno de los procesos de intercambio de calor que integra el ciclo.

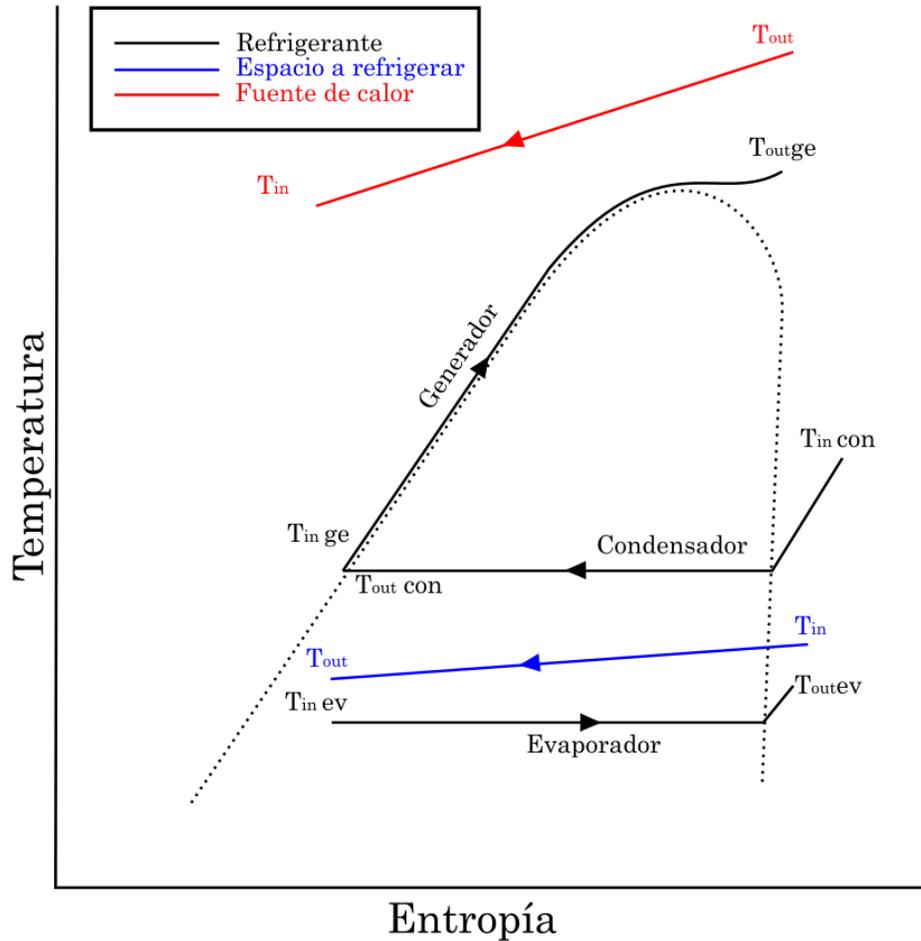


Figura 2.5: Diagrama Temperatura-Entropía ciclo de refrigeración por eyección.

En la Figura 2.5 se muestra el ciclo que sigue el refrigerante por todo los componentes que integran la instalación.

En el generador, el flujo pasa a través de este elemento y cambia de fase a gas a una elevada temperatura y presión intercambiando calor con la fuente externa a una mayor temperatura. El punto óptimo de funcionamiento corresponde a la distancia mínima entre la temperatura del refrigerante (línea negra) y la temperatura de la fuente de calor externa (línea roja) conocido como *pinch point*.

En la línea del condensador el fluido de trabajo cambia de fase de gas a líquido (en la gráfica aparece representado el cambio de fase por una línea horizontal) disipando energía, a una presión y temperatura inferiores a las que se produce el cambio de fase en el generador.

En lo que respecta al evaporador se produce el cambio de fase de líquido a gas a una temperatura y presión mucho más baja que el cambio de fase que se produce en el generador. Su correcto funcionamiento depende de la diferencia de temperaturas que

se establece entre la temperatura del refrigerante (línea negra) y la temperatura del espacio a refrigerar (línea azul).

Ventajas y desventajas de los sistemas de refrigeración por eyección

Los sistemas de refrigeración por eyección son muy atractivos por las posibilidades que ofrecen, aunque por otro lado no es una tecnología ampliamente extendida por algunas razones obvias que llevan a desecharla en ciertos procesos. A continuación se muestran los beneficios y desventajas [10] que ofrecen respecto a los sistemas de refrigeración convencionales por compresor.

Sus principales ventajas son:

- Los eyectores presentan una gran versatilidad para poder funcionar con muchos fluidos de trabajo diferentes, por ello existe una amplia gama de refrigerantes válidos con propiedades muy diferentes, y comprometidos con el medio ambiente que se pueden emplear en el ciclo de eyección.
- El coste de mantenimiento de un eyector es mínimo en comparación con el de un compresor. Esto es debido a su simplicidad mecánica exenta de partes móviles, ni lubricación ni vibraciones. Cabe destacar la existencia de eyectores capaces de modificar su geometría interna mediante el uso de una aguja, lo que produce que su mecanismo sea más complejo, aunque más simple que el de un compresor.
- Su instalación es muy flexible y permite ser ubicado tanto en exteriores como interiores, además de con cualquier orientación.
- Actualmente el coste de la instalación es elevado, pues la producción de eyectores se centra básicamente en la fabricación de prototipos para estudios, pero previsiblemente, el coste inicial de la instalación será muy bajo gracias a la producción en cadena y no se requieren repuestos en su mantenimiento.

Por otro lado, las desventajas más destacables de los eyectores son:

- Las prestaciones que ofrece el eyector caen de forma brusca cuando se opera en condiciones fuera de diseño. Esta es la principal desventaja que presentan y el motivo del estudio realizado para conseguir geometrías con un rango de funcionamiento mucho más amplio.
- Es una tecnología relativamente nueva y a la que le falta madurar para poder suponer una alternativa real y competitiva en aplicaciones de refrigeración respecto a otras.

2.3. Tipos de toberas

El motivo por el que los sistemas de eyección para refrigeración no se han implantando en la actualidad en muchas aplicaciones es la gran pérdida en las prestaciones del ciclo cuando se opera en condiciones fuera de diseño, lo que imposibilita que se consideren como una alternativa competitiva frente a otras tecnologías. Esta es la principal motivación de este proyecto y lo que lleva a estudiar múltiples geometrías del eyector que podrían convertirse en soluciones prometedoras respecto a geometrías convencionales.

El componente más importante dentro del eyector es la tobera por la que circula el flujo principal. La geometría de esta tobera va a condicionar en gran medida la estructura y características del flujo a sus salida, y como consecuencia las prestaciones del eyector.

A lo largo de las próximas líneas se van a mostrar diseños novedosos de toberas, basados en la adaptación del flujo según las condiciones de trabajo para mejorar los rangos de funcionamiento. Se muestra especial atención en aquellos conceptos adaptativos, en los que su geometría va a adecuarse, ya sea por la presencia de partes móviles o por la participación de zonas reservadas para ciertos regímenes.

2.4. Tobera convergente-divergente

La morfología de la tobera convergente-divergente es común a todos los modelos de tobera que se van a presentar y es la base de todas aquellas aplicaciones basadas en flujos supersónicos, pues esta geometría permite acelerar el fluido hasta velocidades superior a $Mach = 1$ por medio de la conversión de la presión y energía térmica en energía cinética.

En estas toberas se pueden distinguir tres zonas (Figura 2.6): la primera de ellas se trata de la **sección convergente**, donde el flujo se acelera hasta alcanzar en la **garganta** condiciones sónicas ($Mach=1$). Aguas abajo de la garganta se encuentra la **sección divergente** de la tobera, donde el flujo sigue acelerándose hasta alcanzar el régimen supersónico para el que fue diseñada.

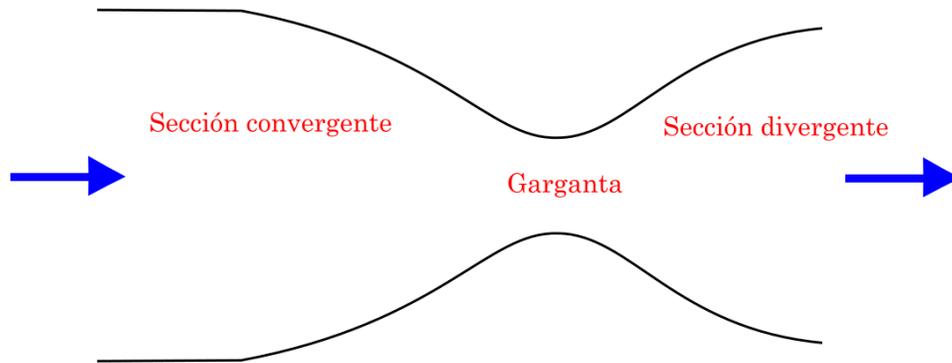


Figura 2.6: Tobera convergente-divergente.

Este fenómeno descrito responde a que las toberas son isentrópicas, es decir, el proceso que tiene lugar en el flujo es reversible y sin pérdidas, y por lo tanto se trata de conductos adiabáticos, sin transmisión de calor del fluido a la tobera o al exterior, idealmente. Por otro lado, el flujo másico que transcurre a lo largo de la tobera es constante en todas las secciones. Esto queda resumido en las Ecuaciones 2.1 y 2.2:

$$h + \frac{1}{2}v^2 = h_{inicial} \quad (2.1)$$

$$\dot{m} = \rho Av \quad (2.2)$$

De las ecuaciones anteriores se puede deducir la Ecuación 2.3

$$\frac{dA}{A} = \frac{dv}{v} \left(\frac{v^2}{a^2} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Es la Ecuación 2.3 la que demuestra el funcionamiento de una tobera convergente-divergente: si $\mathbf{v} < \mathbf{a}$, sección convergente de la tobera, se cumple que $d\mathbf{A} < \mathbf{0}$, es decir, conforme la sección del conducto vaya disminuyendo la velocidad del flujo será mayor. Si por lo contrario $\mathbf{v} > \mathbf{a}$, sección divergente de la tobera, se cumple que $d\mathbf{A} > \mathbf{0}$, lo que se traduce en que si el fluido está en régimen superior al sonido, para que siga aumentando su velocidad, es necesario que aumente la sección del flujo por la que transcurre. Finalmente existe un punto entre la zona convergente y divergente, la garganta, donde se cumple que $d\mathbf{A} = \mathbf{0}$ y por tanto la velocidad del fluido es la del sonido $\mathbf{c} = \mathbf{a}$, para ese fluido en esas condiciones.

El hecho de introducir una tobera convergente en el eyector no asegura que el flujo alcance las condiciones de velocidad supersónica y de presión a la salida. Esto va a depender de la contrapresión a la salida del eyector y puede que provoque que el fluido

se desacelere en la sección divergente. Para diferentes relaciones de presión a la entrada de la tobera y a la salida de la misma se distinguen múltiples regímenes de trabajo [11]:

- **Régimen A:** no existe un gradiente de presiones entre la presión de entrada y la de salida, por lo que el gasto másico que trasiega la tobera es nulo.
- **Régimen B:** la presión a la salida es sensiblemente inferior a la presión a la entrada por lo que el flujo comienza a circular por el conducto. A pesar de ello, el gradiente de presiones no es suficiente para que el flujo alcance condiciones sónicas en la garganta, por lo que el flujo es subsónico en toda la tobera, acelerándose y expandiéndose en la sección convergente y disminuyendo su velocidad y comprimiéndose en la sección divergente, que actúa como un difusor.
- **Régimen C:** la diferencia de presiones entre la entrada y la salida aumenta respecto al caso anterior, provocando que en la garganta se alcancen condiciones sónicas ($M = 1$) y el gasto másico alcanza su máximo. En esta situación la relación entre las áreas A_S/A_g es igual a la crítica A_S/A^* . Excluyendo la sección de la garganta, toda la sección de la tobera es subsónica, incluyendo el chorro a la salida y se cumple que la presión de salida es igual a la del conducto de descarga, más allá de la tobera ($p_s = p_a$).

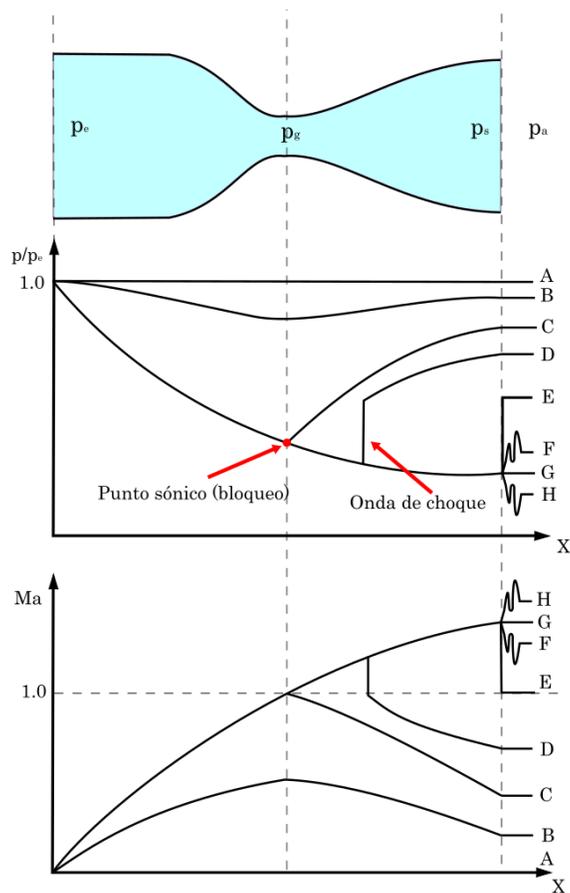


Figura 2.7: Regímenes de funcionamiento para una tobera convergente-divergente.

- **Régimen D:** continuando con el aumento de la diferencia de presiones entre entrada y salida, la garganta permanece bloqueada en los valores sónicos y se sigue cumpliendo que $p_s = p_a$. En este punto el flujo aguas abajo de la garganta es supersónico y aparece una onda de choque normal que irá desplazándose a lo largo del conducto conforme disminuya el valor de la presión a la salida. La onda de choque normal tiene un efecto adverso, produciendo que el flujo que la sigue disminuya su velocidad hasta valores subsónicos. Con ello, la sección divergente que siga a la onda de choque actuará como un difusor que producirá una compresión del flujo hasta que se alcance el valor de p_a .
- **Régimen E:** con esta relación de presiones la onda de choque normal se sitúa justo a la salida de la tobera. En esta situación se consigue flujo supersónico en toda la sección de la tobera aguas abajo de la garganta y el flujo inmediatamente posterior a la salida volverá a ser subsónico por efecto de la onda de choque normal.
- **Régimen F:** a partir de esta configuración, no se produce ninguna onda de choque normal en todo el conducto, comprimiéndose el flujo en el exterior mediante una serie compleja de ondas de choque que deflectan la corriente hasta que se consigue la presión p_a . Este punto de funcionamiento recibe el nombre de sobreexpansión y se caracteriza por la presencia de flujo subsónico en la sección convergente y flujo supersónico en la sección divergente y a la salida de la tobera.
- **Régimen G:** con estas condiciones de funcionamiento se consigue el punto de diseño, donde el chorro sale de la tobera alcanzando la presión p_a sin necesidad de ningún mecanismo que adapte su presión.
- **Régimen H:** recibe el nombre de régimen de funcionamiento subexpandido. En este punto la presión p_a es menor a la presión de diseño. Esta presión aguas abajo de la tobera no puede conseguirse mediante la compresión por ondas de choque oblicuas, sino que tiene lugar mediante un proceso complejo denominado expansión de Prandtl-Meyer, donde el flujo supersónico gira entorno a una esquina convexa, dando lugar a un abanico divergente de un número infinito de ondas de choque.

2.4.1. Ondas de choque

Para comprender mejor el funcionamiento de una tobera supersónica, es apropiado conocer el efecto producido por las ondas de choque en el flujo.

Cuando un gas se mueve entorno a un objeto que viaja a una velocidad determinada, o es el propio gas el que circula por un conducto, sus moléculas se deflectan. Si la velocidad del objeto que circula a través de dicho gas, o la propia velocidad del gas por el conducto es inferior a la velocidad del sonido, la densidad del gas se puede considerar constante y el flujo puede ser descrito mediante las leyes de conservación del momento

y de la energía. Conforme la velocidad del objeto o del gas se incrementa hasta valores próximos a la velocidad del sonido, los fenómenos de compresibilidad no pueden ser despreciados, pues la densidad del fluido va a variar. Se establece como convenio la siguiente clasificación para considerar los diferentes regímenes de compresibilidad en función del número de Mach de un fluido:

- $M < 0.3$ Régimen incompresible
- $0.3 < M < 0.8$ Régimen subsónico
- $0.8 < M < 1.2$ Régimen transónico
- $1.2 < M < 5$ Régimen supersónico
- $M > 5$ Régimen hipersónico

Para corrientes de fluido compresibles con pequeño flujo de giro, el proceso se puede considerar reversible y la entropía constante, pues el cambio en las propiedades del fluido viene dado por las relaciones isentrópicas. Cuando la velocidad del fluido aumenta hasta velocidades superiores a las del sonido y se produce una disminución abrupta en el área de flujo, el proceso es irreversible y la entropía aumenta. Es en este punto, cuando se supera la velocidad del sonido, cuando tienen lugar las ondas de choque.

Las ondas de choque se definen como regiones en el gas donde sus propiedades cambian de forma muy abrupta en muy poco espacio. A lo largo de las ondas de choque la presión estática, la temperatura y la densidad del gas se incrementan de forma prácticamente instantánea. Este fenómeno se produce sin adición de calor por parte de una fuente externa, por lo que la entalpía y la temperatura total se mantienen constantes, Pero como el flujo no es isentrópico, la presión total aguas abajo de la onda de choque siempre será inferior a la presión total antes de la onda de choque. Al cambiar la presión total a lo largo de la onda de choque, no se pueden emplear las ecuaciones de Bernoulli para flujo incompresible con tal de resolver dicho cambio en la presión. Por otro lado, la velocidad del fluido decrecerá en las regiones aguas abajo de la onda de choque.

A continuación se muestran las diferentes ondas de choque según su dirección al plano del flujo y a los efectos que generan.

Ondas de choque normales

Si la onda de choque es perpendicular a la dirección del flujo recibe el nombre de onda de choque normal. En la Figura 2.8 se representa de forma gráfica los vectores que la caracterizan.

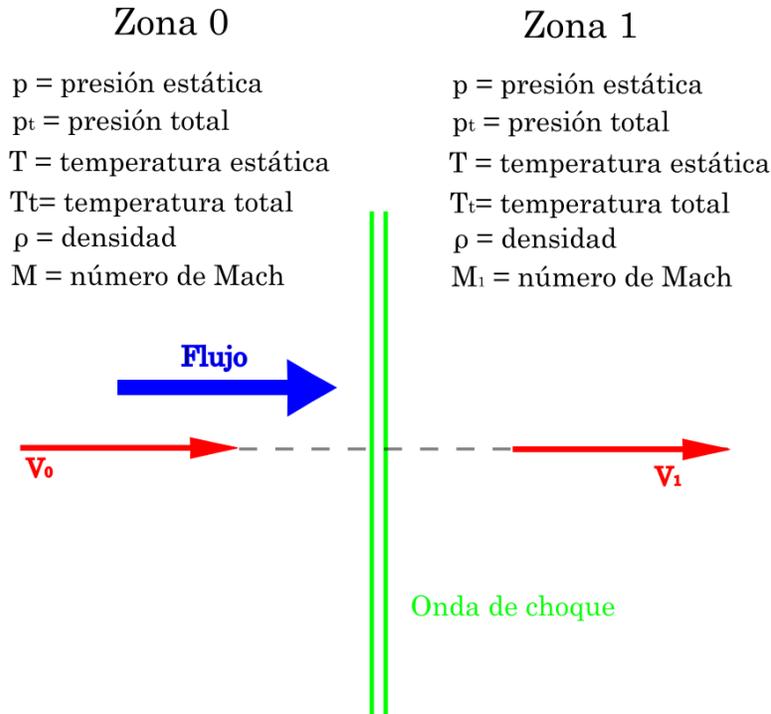


Figura 2.8: Onda de choque normal.

Una onda de choque normal [12] tiene lugar sobre un cuerpo que viaja a velocidades superiores a las del sonido y el flujo es incapaz de permanecer adherido al cuerpo. Este desprendimiento se produce en la práctica en cuerpos que se asemejan a cuñas o conos, tales como los bordes de ataque de las alas en las aeronaves supersónicas. Existen aplicaciones en las que las ondas de choque normales son beneficiosas para garantizar flujo subsónico aguas abajo de la misma, como la combustión en motores a reacción, pues a lo largo de la onda de choque normal el flujo cambia de condiciones supersónicas a subsónicas.

Las ecuaciones que permiten calcular los diferentes parámetros que caracterizan una onda de choque normal son las que derivan de la conservación de la masa, momento y energía de un gas compresible ignorando los efectos de viscosidad y se muestran en las siguientes líneas.

A lo largo de la onda de choque normal el número de Mach decrece hasta el valor especificado M_1 :

$$M_1^2 = \frac{(\gamma - 1)M^2 + 2}{2\gamma M^2 - (\gamma - 1)} \quad (2.4)$$

Tal y como se ha comentado en los párrafos anteriores la temperatura total (T_t) permanece constante a lo largo de la onda de choque:

$$\frac{T_{t1}}{T_{t0}} = 1 \quad (2.5)$$

La temperatura estática (T) se incrementa en la zona 1 según la expresión:

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{(2\gamma M^2 - (\gamma - 1))((\gamma - 1)M^2 + 2)}{(\gamma + 1)^2 M^2} \quad (2.6)$$

La presión estática sigue la evolución que viene definida por la Ecuación 2.7:

$$\frac{2\gamma M^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1} \quad (2.7)$$

La densidad (ρ) se define por la siguiente expresión:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)M^2}{(\gamma - 1)M^2 + 2} \quad (2.8)$$

Finalmente la presión total (p_t) decrece según la Ecuación 2.9:

$$\frac{p_{t1}}{p_{t0}} = \left(\frac{(\gamma + 1)M^2}{(\gamma - 1)M^2 + 2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{(\gamma + 1)}{2\gamma M^2 - (\gamma - 1)} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (2.9)$$

Ondas de choque oblicuas

Los principios que caracterizan una onda de choque oblicua [13] son análogos a los explicados para las ondas de choque normales. La principal diferencia es que en el caso de las normales su dirección es perpendicular a la dirección del flujo, mientras que las oblicuas presentan una cierta inclinación, que viene determinada en gran medida por la forma del objeto que circula en el interior del flujo y de su velocidad, Figura 2.9.

En la práctica las ondas de choque oblicuas ocurren tanto en bordes de ataque como de salida, cuando el fluido vuelve a las condiciones de flujo libre. Las ondas de choque oblicuas tienen efectos beneficiosos para ciertas aplicaciones como comprimir el aire empleado en la combustión antes de entrar en motores. En los eyectores, las ondas de choque oblicuas tienen lugar aguas abajo de la tobera principal como consecuencia de la expansión del flujo mejorando la mezcla de ambas corrientes (principal y secundaria).

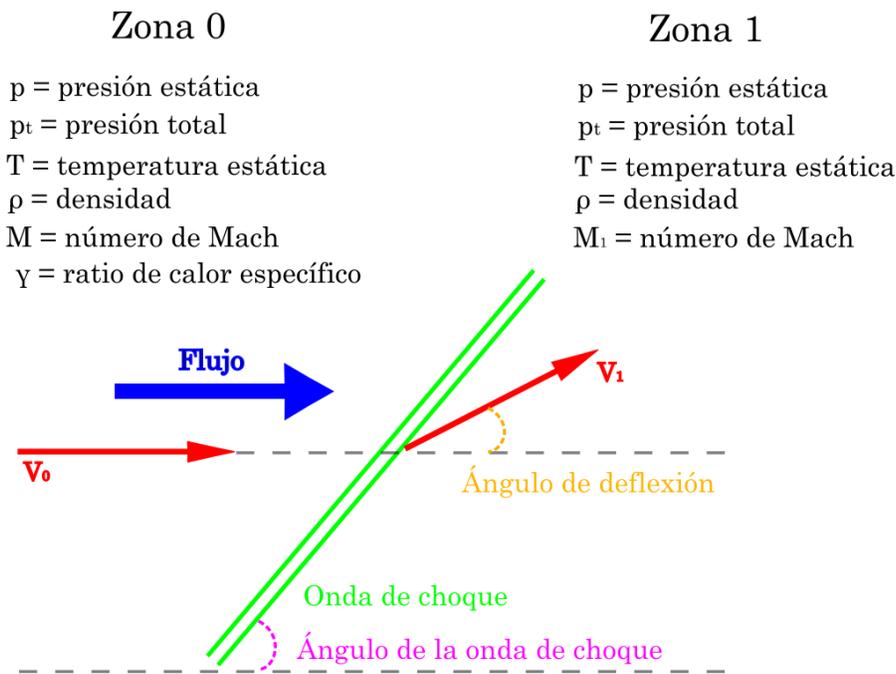


Figura 2.9: Onda de choque oblicua.

Se muestran las ecuaciones que permiten describir los cambios en el flujo producidos por las ondas de choque (Ecuaciones 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14 y 2.15). Al igual que ocurría con las expresiones presentadas para las ondas de choque normales, se extraen de las leyes de conservación de la masa, momento y energía para gases compresibles ignorando los efectos de la viscosidad. Concretamente, las ecuaciones que se presentan están especializadas para un flujo libre bidimensional, sin adición de calor y ángulos de deflexión para los que las ondas de choque tienen lugar.

Para la solución de las ecuaciones para el número de Mach existen dos soluciones posibles (una supersónica y otra subsónica). En la naturaleza se da con más frecuencia la solución supersónica (choque débil) y es la que se considera en estas expresiones, aunque cabe destacar la existencia de la solución subsónica (choque fuerte).

En el sistema de ecuaciones que se muestra, el flujo supersónico a un número de Mach M induce la aparición de ondas de choque sobre el cuerpo con una inclinación β . El flujo es deflectado a lo largo de la onda un ángulo específico α . El ángulo deflectado viene definido por la resolución de las componentes paralelas y perpendiculares de la velocidad del flujo a la onda de choque. La componente paralela se puede considerar constante a lo largo de la onda de choque, mientras que la componente perpendicular se asume que decrece según las relaciones de la onda de choque normal. Combinando las componentes aguas abajo de la onda de choque se determina el ángulo deflectado según la expresión:

$$\cot(\alpha) = \tan(\beta) \left(\frac{(\gamma + 1)M^2}{2(M^2 \sin^2(\beta) - 1)} - 1 \right) \quad (2.10)$$

A lo largo de la onda de choque la velocidad disminuye a un número de Mach (M_1) según la expresión:

$$M_1^2 \sin^2(\beta - \alpha) = \frac{(\gamma - 1)M^2 \sin^2(\beta) + 2}{2\gamma M^2 \sin^2(\beta) - (\gamma - 1)} \quad (2.11)$$

La temperatura total a lo largo de la onda de choque es constante, pero la temperatura estática (T) se incrementa en la zona 1 según la expresión:

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{(2\gamma M^2 \sin^2(\beta) - (\gamma - 1))((\gamma - 1)M^2 \sin^2(\beta) + 2)}{(\gamma + 1)^2 M^2 \sin^2(\beta)} \quad (2.12)$$

La presión total decrece según la expresión:

$$\frac{p_{t1}}{p_{t0}} = \left(\frac{(\gamma + 1)M^2 \sin^2(\beta)}{(\gamma - 1)M^2 \sin^2(\beta) + 2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \left(\frac{(\gamma + 1)}{2\gamma M^2 \sin^2(\beta) - (\gamma - 1)} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (2.13)$$

La presión estática se incrementa según la Ecuación 2.14:

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{2\gamma M^2 \sin^2(\beta) - (\gamma - 1)}{(\gamma + 1)} \quad (2.14)$$

Finalmente la densidad cambia después de la onda de choque según la Ecuación 2.15:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)M^2 \sin^2(\beta)}{(\gamma - 1)M^2 \sin^2(\beta) + 2} \quad (2.15)$$

Ondas de choque Prandtl-Meyer

Como se ha comentado en los apartados anteriores, cuando un objeto se mueve en el interior de un fluido con una velocidad superior a la del sonido, o es el mismo fluido el que circula por el interior de un conducto a velocidades supersónicas, en los cambios abruptos de sección, en concreto en aquellas zonas donde la sección disminuye, se generan ondas de choque. Sin embargo, cuando el área por donde circula el flujo aumenta, se produce un efecto distinto al descrito. Si este incremento es muy abrupto se desprenden ondas de choque que reciben el nombre de Prandtl-Meyer [14], Figura 2.10, y presentan diferencias marcadas respecto a las ondas de choque anteriores.

γ = Ratio específico de calor

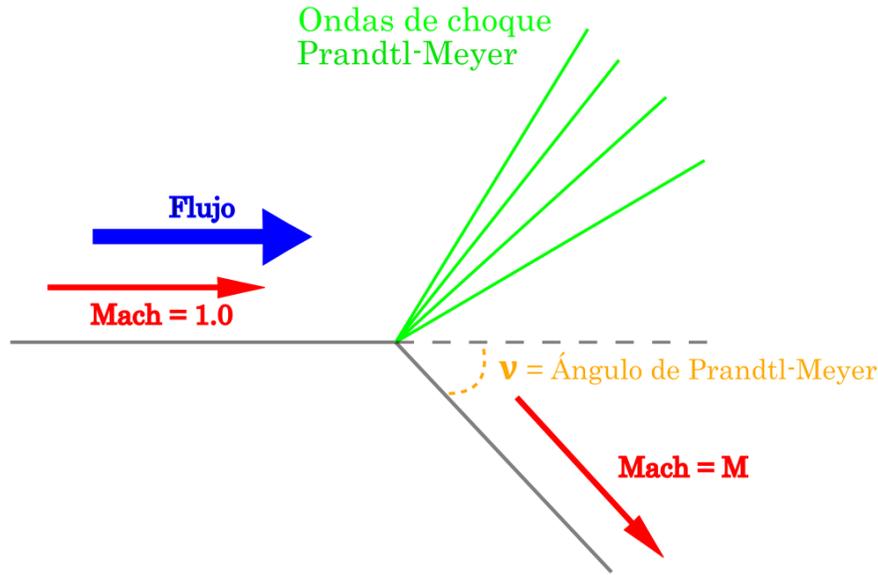


Figura 2.10: Onda de choque Prandtl-Meyer.

Cuando se produce una onda de choque oblicua, el número de Mach disminuye, la presión estática se incrementa y la presión total disminuye, pues el proceso que tiene lugar es irreversible. En cambio, en las ondas de choque de Prandtl-Meyer, el número de Mach se incrementa, la presión estática disminuye y la presión total permanece constante al tratarse de una expansión isentrópica. El incremento del número de Mach depende tanto de la propia velocidad como del ángulo de expansión.

La función de Prandtl-Meyer (Ecuación 2.16) se expresa por la letra ν , deriva de las ecuaciones de conservación de la masa, momento y energía y es función del número de Mach (M) y el ratio específico de calor del propio gas (γ).

$$\nu = \sqrt{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} (M^2 - 1)} - \tan^{-1} \sqrt{M^2 - 1} \quad (2.16)$$

La interpretación física de la función de Prandtl-Meyer es que es el ángulo a través del cual debe expandir un flujo sónico ($M = 1$) para alcanzar un número de Mach determinado. Esta es la razón por la que el valor de la función recibe a su vez, el nombre de ángulo de Prandtl-Meyer.

2.5. Tobera Aerospike

A lo largo del documento se lleva repitiendo la necesidad de mejorar el rango de funcionamiento de los sistemas de refrigeración por eyección, pues cuando se abandonan

las condiciones de diseño del eyector, las prestaciones del ciclo caen de forma drástica, siendo esta la razón por la que la tecnología no se ha desarrollado y no goza de presencia en la industria actual.

Una de las formas de mejorar y ampliar el rango de funcionamiento de los eyectores y que es el objeto de estudio de este documento es la morfología de la tobera principal del eyector.

Actualmente muchas corporaciones espaciales (NASA, ONERA, etc.) y compañías de aviación (Boeing, Snecma Motors, etc.) están invirtiendo parte de sus recursos en mejorar la actuación y la rentabilidad de las toberas supersónicas en motores cohete y lanzaderas espaciales con el estudio de nuevos conceptos de tobera respecto a los diseños convencional (convergente-divergente) para mejorar la adaptación del flujo a la salida del chorro. Uno de los conceptos más prometedores y a los que se ha prestado más atención ha sido a los diseños de tobera adaptativos a la altitud de vuelo

La tobera aerospike empezó a desarrollarse desde la década de los 50 en Europa, Rusia, Estados Unidos y Japón. Esta morfología de tobera nace de la necesidad de mejorar su eficiencia a lo largo de un gran rango de altitudes, consiguiendo una adaptación continua, al menos teóricamente, en su relación de área geométrica. En su diseño cabe esperar una reducción de peso respecto a las toberas convencionales, aunque en la aplicación de los eyectores no es de mucha importancia, en las lanzaderas es un factor determinante, además de no incorporar partes móviles en su mecanismo, lo que simplifica en gran medida su funcionamiento y mantenimiento. A pesar de todo ello, esta tecnología no se ha implementado en ninguna misión real y se encuentra en una fase de maduración donde se requiere de un mayor número de ensayos de vuelo para poder establecer una comparación de sus prestaciones frente a las toberas convencionales y su aptitud respecto a las simulaciones CFD y predicciones analíticas.

Su diseño se basa en una tobera convencional de campana, pero con su perfil al revés. Este diseño de tobera tiene muchas variaciones, aunque se pueden distinguir dos grandes grupos: las toberas circulares y las lineales. Se va a focalizar en el primero de ellos por ser el utilizado en el estudio de prestaciones del eyector.

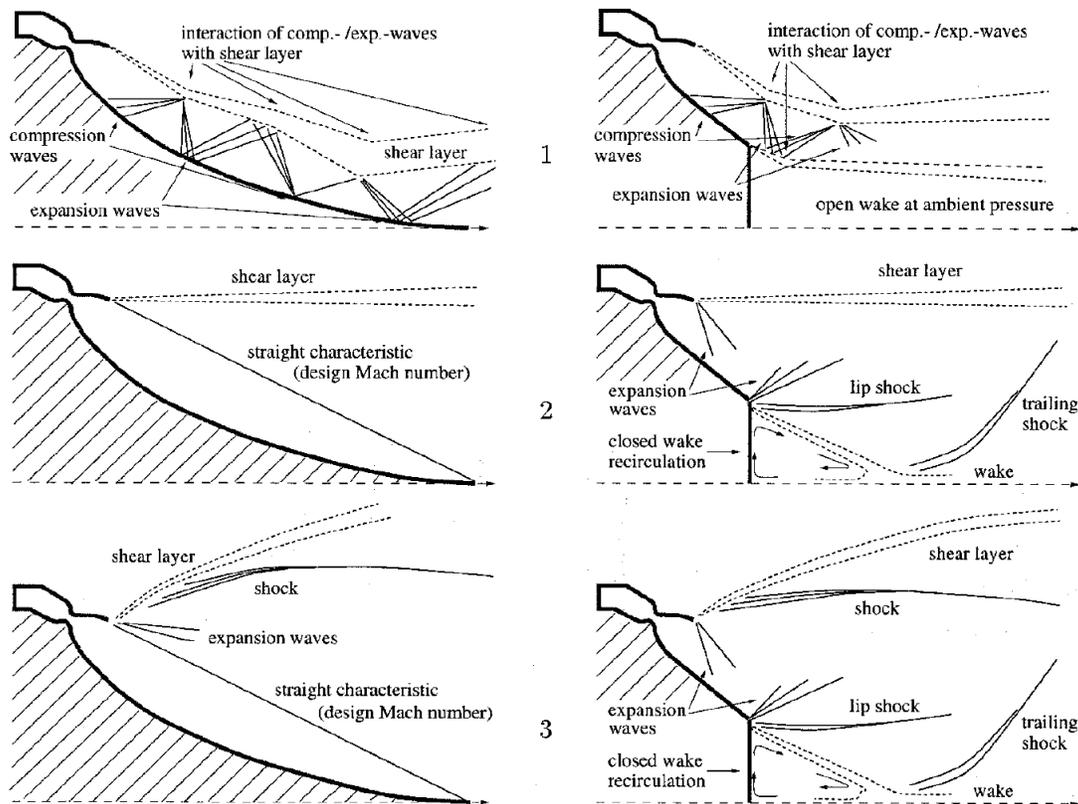


Figura 2.11: Regímenes de funcionamiento para una tobera aerospike [3].

Dentro de las toberas aerospike circulares se puede distinguir entre aquellos diseños que tienen toda la longitud completa o los que tienen el aerospike truncado. En la Figura 2.11 se representan para ambas configuraciones los distintos modos de funcionamiento según las condiciones de contorno.

Para relaciones de presión inferiores a la presión de diseño, con un cuerpo central bien definido, el flujo se expande cerca del cuerpo de la tobera sin separación y se produce un sistema de recompresión del flujo con presencia de ondas de choque y que interactúan con el propio cuerpo de la tobera adaptando el flujo de escape a la presión de descarga. La característica forma de barril con varias inflexiones de la capa de cizallamiento resulta de las interacciones de la compresión y de las ondas de expansión con la propia capa, y la difusión turbulenta produce un agrandamiento de la capa de cizallamiento aguas abajo de la garganta. La existencia de sobreexpansiones y recompresiones se infiere de las variaciones positivas y negativas de los perfiles de presión de pared de la tobera observadas en varias pruebas de flujo frío y simulaciones numéricas.

Para una relación de presiones en diseño, imagen central de la Figura 2.11, las características con el Mach de diseño debe formarse una línea recta que emana de la punta donde empieza el aerospike hasta el final de la propia tobera, y la capa de cizallamiento es paralela al eje central. Sin embargo, existen configuraciones de tobera donde no se

puede lograr un perfil de flujo de salida unidimensional exacto, porque los métodos de resolución emplean las relaciones de Prandtl-Meyer que son únicamente válidas para flujos planos. Además, el flujo no-homogéneo en la región de garganta, generalmente no considerado dentro del proceso de diseño abarcado, influye en el flujo de salida del perfil. La distribución de presión de pared permanece constante en relaciones de presión superiores a la relación de diseño, es decir, el aerospike se comporta como una tobera convencional, perdiendo su capacidad de adaptación según la altura.

Finalmente, la imagen inferior de la Figura 2.11 representa el campo de flujo para relaciones de presiones más altas a las de diseño. En esta etapa la capa de cizallamiento pasa a presentar un ángulo más abierto para dejar de ser paralela al eje de la tobera. En este punto el comportamiento es muy similar al que ocurría en el caso de relaciones de presión en diseño con la única diferencia de la aparición de ondas de choque de expansión.

Para una tobera aerospike con el perfil truncado, los regímenes de funcionamiento son muy parecidos a los anteriormente expuestos, aunque es interesante contemplar las sutiles diferencias que se establecen. Para relaciones de presiones más bajas que las de diseño, se establece una estela abierta con una presión prácticamente igual a la presión de descarga, Figura 2.11 superior. Para una relación de presiones cercana a la de diseño para la aerospike de perfil completo, la base del flujo cambia repentinamente su carácter y pasa a cerrar la estela que quedaba abierta, caracterizándose por una presión constante y que no esta influenciada por la presión de descarga. Los estudios muestran que las toberas con un perfil más corto provocan un cambio más temprano en el flujo, de forma que se abandona la forma de estela abierta a relaciones de presión por debajo de la relación de presión de diseño. En el punto de transición, la presión dentro de la estela se acerca a un valor que está por debajo de la presión de descarga, y el área de la base induce un impulso negativo, Figura 2.11 central. Esta pérdida en el empuje viene determinada por el porcentaje de truncamiento y el tamaño total del área de la base. Los datos experimentales que se han obtenido en estudios demuestran que existe una pérdida en empuje para cuerpos más cortos debido a que el área de la base aumenta.

Más allá del punto de transición, la presión dentro de la estela cerrada permanece constante. Para presiones de descarga bajas, la presión base es mayor que la presión de la cámara a la que se va a descargar, habitualmente la atmósfera, provocando un empuje positivo. En la Figura 2.12 se compara el impulso específico producido por una tobera aerospike de perfil completo con una de perfil truncado y otra convencional donde se pueden observar los fenómenos descritos.

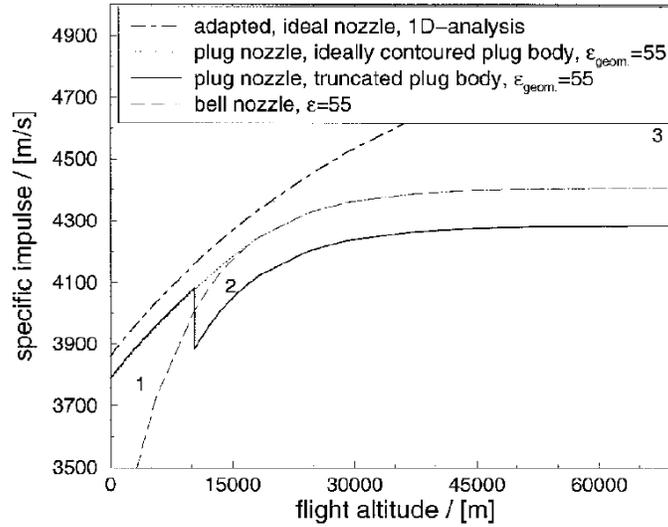


Figura 2.12: Comparativa del impulso específico desarrollado por una tobera aerospike de perfil completo, truncado y una tobera convencional [3].

2.6. Parámetros característicos de un sistema de refrigeración por eyección

Los parámetros más extendidos para caracterizar la actuación de un eyector y la capacidad de refrigeración del sistema que los alberga son los que se muestran a continuación:

- **Ratio de arrastre (ω):** se define como la relación entre el gasto másico del flujo secundario, \dot{m}_s , y el gasto másico del flujo primario, \dot{m}_p . Su expresión corresponde a la Ecuación 2.17. Se trata de uno de los parámetros más importantes pues da información sobre la capacidad de refrigerar del eyector y en este estudio se va a emplear para optimizar geometrías y caracterizar el buen funcionamiento del eyector.

$$\omega = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (2.17)$$

- **Ratio de compresión (R_c):** se define como la relación entre la presión estática a la salida del difusor del eyector, p_c , y la presión estática del flujo secundario, p_e . Su expresión corresponde a la Ecuación 2.18. Este parámetro proporciona información sobre el rango de operación del eyector.

$$R_c = \frac{p_c}{p_e} \quad (2.18)$$

- **Coficiente de prestaciones (COP):** se trata del ratio entre la energía por tiempo de evaporación, \dot{Q}_e efecto de refrigeración, y la energía por tiempo total

aportada al ciclo, $\dot{Q}_g + \dot{L}_p$, siendo \dot{Q}_g la energía por tiempo aportado por el generador y L_b a la potencia de la bomba para conseguir la circulación del fluido. Su expresión se corresponde a la Ecuación 2.19 y al igual que el ratio de arrastre es muy importante pues aporta información sobre la eficiencia del eyector.

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g + L_b} \quad (2.19)$$

- **Capacidad de refrigeración (CC):** se define como el producto del gasto másico trasegado por el conducto secundario y el gradiente de entalpías entre la entrada y la salida del conducto secundario. Su expresión se corresponde con la Ecuación 2.20:

$$CC = m_e(h_{e,out} - h_{e,in}) \quad (2.20)$$

2.7. Aplicaciones de los eyectores en sistemas de refrigeración

Como se ha ido repitiendo a lo largo del documento, la instalación de eyectores en sistemas de refrigeración es una tecnología muy prometedora y que se sitúa como alternativa competitiva en multitud de aplicaciones gracias a su gran flexibilidad. Su interés pasa por la actual necesidad de reducir las emisiones de CO_2 en los procesos industriales y combustión en los motores alternativos, pudiendo recuperar parte de la energía en forma de calor de los gases de escape que se emiten a la atmósfera, o cubriendo la creciente demanda de explotar las fuentes de energía renovables con tal de reducir el abuso en el consumo de combustibles fósiles.

En el presente documento se va a tratar el estudio de la tecnología de eyectores aplicado a refrigeración doméstica, aprovechando la energía solar mediante el uso de un colector solar [15].

Una de las principales problemáticas de los eyectores es la pérdida de prestaciones en el ciclo cuando se abandonan las condiciones de diseño, lo que supone una gran dificultad en la aplicación propuesta por las fluctuaciones en las condiciones climáticas y la irradiación solar.

El esquema del sistema que va a permitir la refrigeración es análogo al mostrado en la Figura 2.4, donde el generador va a recibir el calor recogido por el colector solar a través de un sistema de almacenamiento térmico, Figura 2.13. El reflector solar presenta una forma parabólica para concentrar la irradiación del sol en un punto donde se sitúa la tubería por la que circula el líquido que va a transportar la energía térmica. Dicho fluido va a estar recirculando constantemente por el sistema de almacenamiento térmico, donde va aumentando su temperatura con el tiempo. A su vez, el sistema de almacenamiento sirve para desacoplar el funcionamiento del sistema de las condiciones

cambiantes del entorno (como podría ser el paso de una nube), es decir, elimina la intermitencia de la energía térmica transportada.

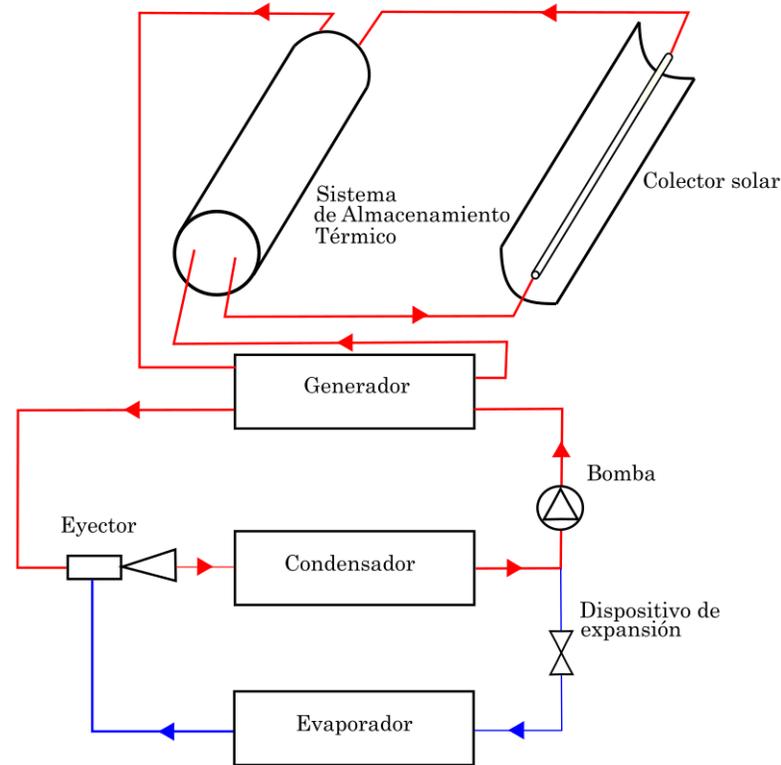


Figura 2.13: Sistema de refrigeración por eyección con colector solar.

2.8. Fluido de trabajo. Refrigerantes

Un refrigerante [16] se define como cualquier cuerpo o sustancia que absorbe calor de otros y actúa como agente de enfriamiento. En el ciclo de refrigeración por eyección se trata del fluido que sirve como medio de transporte de calor desde donde lo absorbe por ebullición, a baja temperatura y presión, hasta donde lo cede al condensarse a una temperatura y presión más elevada.

En la práctica cualquier sustancia que sea capaz de cambiar de líquido a vapor y viceversa puede funcionar como refrigerante, pero van a ser sus propiedades, especialmente el rango de presiones y temperaturas a las que sea capaz de realizar estos cambios, lo que va a marcar que sea apta para una aplicación comercial.

Tradicionalmente, cuando se desconocían las consecuencias nocivas al emplear algunos fluidos, se primaba la utilización de aquellos refrigerantes que maximizaban las prestaciones del ciclo de refrigeración. En los últimos años se ha tomado conciencia de los efectos adversos del uso de algunos de estos refrigerantes y por ello se ha limitado su

uso o incluso prohibido. Los dos principales índices a los que se presta atención para determinar si un refrigerante no es nocivo para el medio ambiente es el ODP (*Ozone Depletion Potential*) y el GWP (*Global Warming Potential*).

En general hay una serie de propiedades que un refrigerante ha de cumplir para poder operar en ciclos de refrigeración. No hace falta decir que ningún refrigerante reúne todas las cualidades beneficiosas, por lo que hay que seleccionar aquel que establezca un compromiso entre rendimientos del ciclo de refrigeración y los efectos que puede suponer la exposición de las personas o del ambiente a su contacto para la aplicación en la que se quiera emplear.

2.8.1. Tipos de refrigerantes

Actualmente existen dos grandes familias de refrigerantes [17] según su origen: naturales y sintéticos.

Refrigerantes naturales

Se trata de gases cuyo índice de ODP y GWP es nulo, por lo que se trata de refrigerantes que constituyen una de las alternativas más sostenibles. Generalmente, sus aplicaciones son más limitadas si se comparan con las alternativas sintéticas, principalmente debido a que suelen ser sustancias inflamables o tóxicas para las personas que entran en contacto con ellas, como podrían ser los hidrocarburos o el amoníaco. No obstante, su comercialización en los últimos años ha aumentado debido a su bajo impacto ambiental que los ha llevado a convertirse en una opción real para aplicaciones futuras.

Algunos ejemplos son el R-600a (isobutano), el R-290 (propano), R-170 (etano), R-1270 (propileno), R-717 (amoníaco), R-744 (dióxido de carbono)...

Refrigerantes sintéticos o fluorados

En esta categoría existen cuatro tipos de refrigerantes de la familia de los hidrocarburos halogenados:

- **CFC (Cloro, Flúor y Carbono)** : reciben el nombre de clorofluorocarbonos y su principal característica es la ausencia de hidrógeno en su molécula química, de ahí su gran estabilidad. Esta estabilidad a su vez favorece su persistencia en la atmósfera y su influencia sobre la capa de ozono convirtiéndose en un agente que propicia el efecto invernadero. Su fabricación está prohibida desde el 1995 y algunos ejemplos son el R-11, R-12, R-115...

- **HCFC (Hidrógeno, Carbono, Flúor y Cloro)**: se trata de una tipología similar a la anterior, con la principal diferencia de poseer en su molécula química átomos de hidrógeno. Respecto a los anteriores posee un ODP reducido. Algún ejemplo de este tipo sería el R-22.
- **HFC (Hidrógeno, Flúor y Carbono)**: no es más que un fluorocarbono sin cloro y con presencia de átomos de hidrógeno en sus moléculas. Su principal ventaja es que su índice de ODP es nulo. Algunos ejemplos son el R-134a, el R-141b.
- **HFO (hidrofluoro-olefina)**: se trata de la cuarta generación de refrigerantes basados en flúor y han sido diseñados para sustituir a los HFC. Sus principales ventajas pasan, igual que los anteriores, por presentar un índice de ODP nulo, pero además, tienen un impacto menor en el calentamiento global (índice GWP), estableciéndose como la alternativa más comprometida para el medio ambiente. Algunos ejemplos son el R-1234yf, R-448a, R-449a, R-452a...

2.8.2. Identificación de los refrigerantes

La identificación de los refrigerantes [16] se basa en un código de expresión alfanumérica que lo define a partir de su fórmula química. Responde al Real Decreto 138/2011 del 4 de febrero por el que se aprobó el Reglamento de Seguridad para instalaciones Frigoríficas y su significado es el que sigue: el primer carácter, desde la izquierda, es una R, refiriéndose a su propia condición de refrigerante. La primera cifra, desde la derecha, indica el número de átomos de flúor de la molécula química en caso de carecer de bromo. La cifra contigua indica el número de átomos de hidrógeno de su molécula más uno. A la izquierda de la anterior se indica el número de átomos de carbono de su molécula química menos uno (en caso de ser 0 no se indicará). A la izquierda, junto a la anterior cifra, en caso de los compuestos no saturados se antepondrá el número 1, completando las cuatro cifras. Si en la molécula existiesen átomos de bromo, se indicaría con una B a la derecha, seguida del número de dichos átomos. Finalmente, en el caso de los compuestos isómeros, el más simétrico en cuanto a sus pesos atómicos se indicará sin ninguna letra al final de los números. Conforme aumenta la simetría se colocarán las cifras a, b, c...

Para mayor comprensión de la anotación de los refrigerantes se muestran en la Figura 2.14 un ejemplo de su identificación:

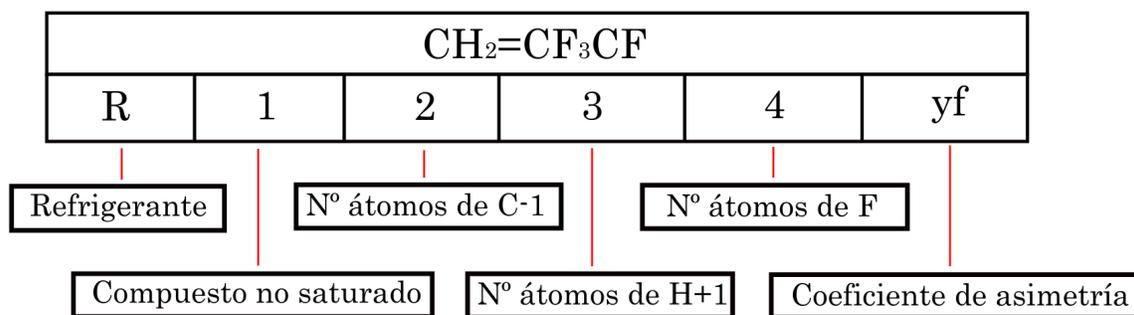


Figura 2.14: Ejemplo de identificación de los refrigerantes, R1234yf.

2.8.3. Refrigerante R-600a. Isobutano

El isobutano R-600a se trata de un refrigerante que ya ha aparecido en las líneas anteriores, pertenece a la familia de los refrigerantes naturales lo que lo convierte en una alternativa competitiva en aquellas aplicaciones en las que puede sustituir a otros refrigerantes sintéticos, que a diferencia del isobutano, tienen un gran impacto ambiental. Su índice de ODP es nulo, al igual que su GWP prácticamente insignificante. Se trata de una sustancia que proviene del petróleo, de ahí su facilidad de adquisición, pues abunda en la naturaleza. Se trata de un refrigerante que empezó a usarse en los años 40 y que actualmente es ampliamente utilizado para refrigeradores domésticos, aunque también se puede encontrar en aplicaciones para conservación de alimentos en industrias o en automoción.

Entre sus múltiples propiedades cabe destacar que el R-600a presenta una presión de vapor menor que otros refrigerantes para un mismo rango de temperaturas, lo que es en gran parte beneficioso, pues este parámetro va a determinar la robustez del condensador y eyector (cuanto más alta sea la presión, el equipo de trabajo será más robusto y a su vez más caro). Cabe destacar que a pesar de buscar bajas presiones de trabajo en el evaporador y condensador, estas deben ser superiores a la atmosférica (positivas). La razón que lleva a trabajar con presiones positivas es para prevenir la entrada de aire al sistema en caso de una fuga.

En lo que concierne al rango de temperaturas de trabajo, son tres las temperaturas que hay que considerar para la selección de un refrigerante: la de ebullición, crítica y la de congelación. Tal y como se ha comentado anteriormente, el isobutano presenta una temperatura de ebullición, en contraste con otros refrigerantes, baja, lo que permite operar a temperaturas relativamente bajas en el evaporador. Esta temperatura está directamente relacionada con la presión de vapor y es importante conocer el rango de trabajo. En la Figura 2.15 se representa la relación presión de vapor-temperatura para el R-600a.

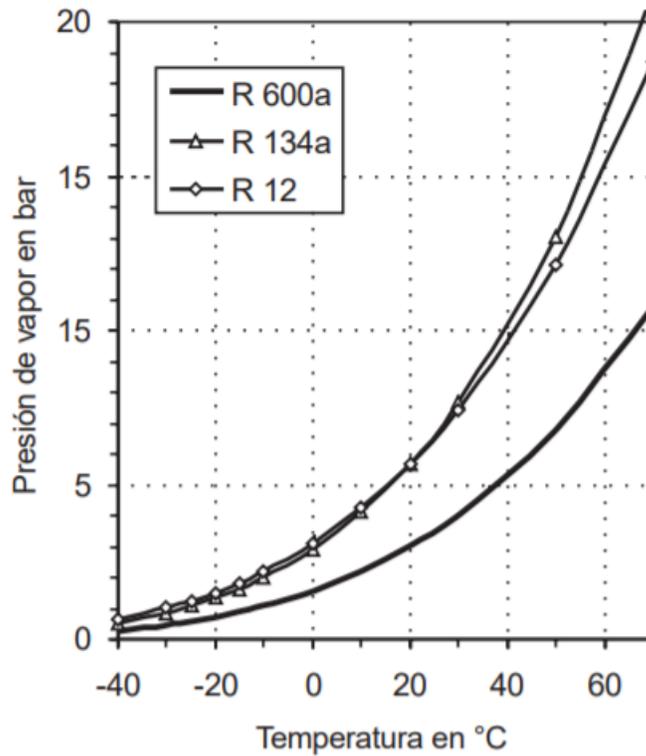


Figura 2.15: Gráfico Presión de vapor-Temperatura para el R-600a [4].

En cuanto a la temperatura crítica, hace referencia a la temperatura por encima de la cual un gas no puede ser licuado aumentando la presión. Esta temperatura para el isobutano es de 135°C .

Finalmente, la temperatura de congelación ha de ser más baja que la temperatura de trabajo del evaporador. Para el caso del isobutano, está temperatura es de -159°C , por lo que cumple perfectamente con la aplicación para la que se ha diseñado el ciclo de refrigeración por eyección.

Otros aspectos que van a marcar la elección de un refrigerante para una aplicación concreta es su grupo de seguridad designado por su inflamabilidad y toxicidad. Según la Sociedad Estadounidense de Ingeniería de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), en la Norma 34 [18] se establece la clasificación que se muestra en la Tabla 2.1:

	Toxicidad más baja	Mayor toxicidad
Mayor inflamabilidad	A3	B3
Menor inflamabilidad	A2	B2
	A2L	B2L
Sin propagación de llamas	A1	B1

Tabla 2.1: Niveles de inflamabilidad y toxicidad para los refrigerantes según la Norma 34 de ASHRAE.

Se refiere a los refrigerantes por dos dígitos alfanuméricos: el primero de ellos hace referencia a la toxicidad del producto y se diferencian dos letras, *A* para los refrigerantes que no se ha identificado toxicidad con concentraciones inferiores o iguales a 400 ppm por volumen, mientras que *B* para los que existen evidencias de toxicidad en concentraciones por debajo de 400 ppm por volumen. El segundo dígito hace referencia a la inflamabilidad del refrigerante y se designa por un número, del valor más bajo (1), al valor más elevado (3), a excepción del segundo nivel que se subdivide en dos clases, en el que la letra *L* se emplea para referirse a los refrigerantes de nueva generación HFO.

El caso del isobutano presenta una toxicidad nula, aunque es altamente inflamable y explosivo, lo que permite incluirlo en el grupo **A3**.

A modo de resumen, la Tabla 2.2 [19] comprende todas las propiedades de interés del R-600a y que han llevado a elegirlo para la aplicación de diseño:

Propiedades	
Formula	$(CH_3)_3CH$
Forma/estado	Gas
Forma/Figura	Gas líquido
Color	Incoloro
Olor	Etéreo
pH	No aplicable
Punto de fusión	-159 °C
Punto de ebullición	-12 °C
Temperatura crítica	135 °C
Límite de inflamabilidad-superior	8.5 %
Límite de inflamabilidad inferior	1.8 %
Presión de vapor	304 kPa (20°C)
Densidad de vapor (aire=1)	2.06
Densidad relativa	0.59
Solubilidad en agua	54 mg/l (25°C)
Temperatura de autoignición	460 °C
Peso molecular	58.1 kg/kmol

Tabla 2.2: Propiedades del refrigerante isobutano R-600a.

Capítulo 3

Modelado CFD

En este capítulo se expone de forma detallada todas las etapas del proceso CFD que se ha seguido para el análisis de la geometría del eyector diseñado. Se empezará explicando todo lo que concierne a la teoría de *Computational Fluid Dynamics*. Seguidamente, se tratará la creación de la geometría del eyector, citando cotas más relevantes y que van a influir en mayor medida en las prestaciones del mismo. A continuación, se presentará el procedimiento de mallado que se ha seguido para la obtención de resultados, es decir, tipo de elementos empleados, independencia de malla, densidad de elementos... Se abordará las condiciones de contorno impuestas para emular las condiciones de trabajo, los modelos de turbulencia usados para su resolución, residuales y parámetros empleados para la monitorización del problema y poder declarar la convergencia de la solución final. Finalmente se mostrarán los resultados obtenidos y el postprocesado de los mismos para llegar a una solución crítica de la que se puedan obtener las conclusiones.

3.1. Teoría de la mecánica de fluidos computacional

La mecánica de fluidos computacional, del inglés "*Computational Fluid Dynamics*" (CFD), se trata de una de las ramas de la mecánica de fluidos en la que se utilizan herramientas basadas en análisis numéricos y estructuras de datos para analizar problemas y situaciones de corrientes de fluido, transmisión de calor y otros fenómenos físicos. Para dichas simulaciones la herramienta empleada para resolver todas las ecuaciones de fluido que gobiernan el problema son ordenadores con una alta capacidad de cálculo que van a permitir simular las condiciones de flujo libre, interacciones de líquidos y gases con superficies, capas límite...

El CFD [20] es una herramienta muy interesante e indispensable en el proceso de ingeniería actual por tratarse de una herramienta que muchas veces es más barata que el experimento equivalente y que permite establecer un punto de partida con la obtención de información detallada sin usar medidas intrusivas. De todas formas, la construcción

de prototipos y experimentación con modelos y finalmente la construcción del sistema y su prueba final son indispensables para finalizar el proceso de puesta a punto del sistema en cuestión.

A pesar de las muchas ventajas que ofrece el CFD, este también presenta ciertas limitaciones en su uso, y es que es una herramienta muy compleja que necesita de personal especializado y capacitado para poder desarrollar sus múltiples etapas, habitualmente un equipo que cubra las operaciones de CAD, dinámica de fluidos, métodos numéricos, informática y aspectos particulares de la simulación en cuestión. Por otra parte los problemas complejos requieren de gran capacidad de potencia de cálculo que a veces se convierten en inabordables o resultan más caros y complejos que la experimentación con prototipos, pues hay que tener en cuenta muchos factores: precio de la estación de trabajo, cluster y su mantenimiento, licencias de los programas empleados para la resolución del CFD y finalmente los recursos humanos empleados. Para concluir, los resultados obtenidos por simulaciones pueden ser muy espectaculares, aunque no tienen por qué ser correctos y en muchas ocasiones distan de la realidad.

En los siguientes apartados se exponen las fases que engloba el CFD: preproceso, resolución y postprocesado de la solución obtenida. A modo de resumen se muestra en la Figura 3.1 un cuadro con las fases seguidas en cada uno de los bloques.

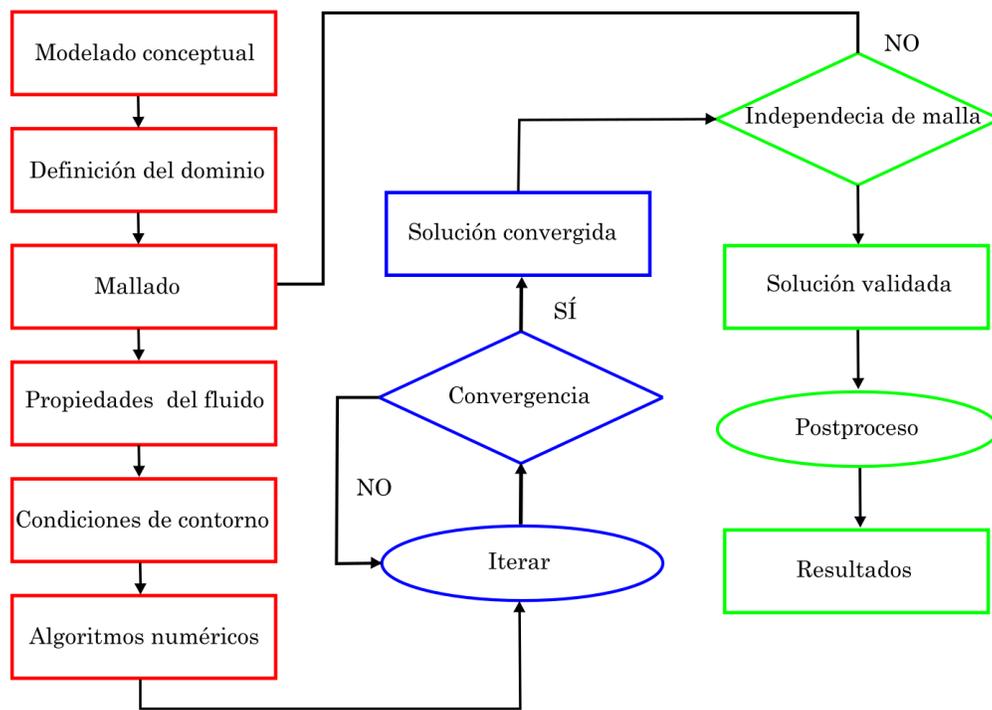


Figura 3.1: Pasos seguidos en la simulación de un problema mediante CFD. **Preproceso**, **solver**, **postproceso**.

3.1.1. Preproceso

El preproceso se trata de la primera fase del CFD y es una de las más importantes, pues de ella van a depender los resultados obtenidos cuando el caso se resuelva. Los procesos que comprende el preproceso son las siguientes:

- Modelado conceptual de la geometría o problema que se va a estudiar y definición del dominio de cálculo.
- Mallado del dominio, discretizando el problema en un número finito de elementos.
- Definición de los modelos que se van a utilizar para resolver el problema y especificación de las propiedades del fluido de trabajo.
- Establecimiento de las condiciones de contorno que van a limitar el problema en cada una de las fronteras del dominio.
- Inicialización del problema con los valores numéricos predefinidos.

Modelado conceptual, dominio y geometría

En esta etapa se pretende definir la geometría, concretando los objetivos que se persiguen con la resolución CFD del problema. Es en este punto donde se debe de realizar un análisis para tomar ciertas decisiones [21] que van a influir en gran medida al coste computacional de la resolución de la simulación.

Se debe definir la dimensión del problema (**2D** o **3D**) pues si se toman las tres dimensiones los recursos empleados para la resolución serán mucho mayores que si se puede simplificar a un problema bidimensional, como es el caso de la geometría del eyector. Por otro lado, las simetrías en la geometría pueden simplificar los cálculos con la extensión de los resultados obtenidos a un lado del eje de simetría. Finalmente, otra consideración que debe estipularse es si el problema planteado se trata de un problema estacionario o si de lo contrario se trata de uno transitorio, donde la variable tiempo cobra importancia y el coste computacional será muchísimo mayor.

Antes de pasar a la siguiente fase de mallado es necesario realizar un estudio previo para poder estimar el coste computacional que va a requerir la resolución de la simulación y si se dispone de los medios disponibles. Para completar este proceso se necesita de apoyo de experiencia previa, revisiones bibliográficas u otras herramientas en caso de disponerlas, como serían modelos analíticos o medidas experimentales en bancos de ensayo.

Finalmente, para la construcción CAD de la geometría que se va a estudiar se debe considerar la elaboración desde cero para geometrías sencillas, o en el caso de geometrías más complejas se puede optar por ingeniería inversa, con un escaneado y una reconstrucción del elemento, o importar la geometría de librerías existentes. El diseño previo

debe perfilarse y purgarse *clean-up*, es decir, eliminar todos aquellos detalles no relevantes, que no van a aportar información en la solución y que van a suponer un aumento en los recursos empleados para resolver el problema, con tal de obtener un volumen de control cerrado representativo del problema y que permita extenderlo hasta tener el dominio deseado.

Mallado

El mallado [6] del dominio de control es una de las fases más importantes y que va a tener una gran repercusión en la resolución del problema. Esta etapa pasa por la discretización del sistema en un volumen finito de elementos donde se van a resolver las ecuaciones propias del fluido. A lo largo de las siguientes líneas se va a describir el proceso de mallado para obtener los mejores resultados posibles en la resolución del problema.

En primer lugar, hay que notar que según la disposición de las celdas en la malla se puede distinguir entre **mallas estructuradas** y **mallas no estructuradas**. Para un caso 1D, donde el dominio se ha dividido en un número concreto de celdas, las celdas se conectan entre ellas por ambos lados con otras celdas o con una de las condiciones de contorno que gobierna el problema. En este caso es trivial el orden que van a seguir estas celdas, de forma que cada celda n tiene como vecina a una celda $n - 1$ y al otro lado $n + 1$. Queda clara la conectividad entre las celdas que conforman la malla y la interacción entre ellas, donde la información de la celda n va a estar influenciada únicamente por las contiguas $n - 1$ y $n + 1$.

Esta regla descrita se puede extrapolar a un caso 2D, donde la forma de operar es análoga a la de un caso 1D y lo mismo para un caso 3D, aunque como es lógico, con más complejidad, debido al mayor número de uniones entre celdas.

Cuando la conectividad entre las celdas que conforman la totalidad de la malla no es trivial, dicha malla recibe el nombre de **malla no estructurada**. En la Figura 3.2 se muestra un ejemplo de malla estructurada frente a uno de malla no estructurada:

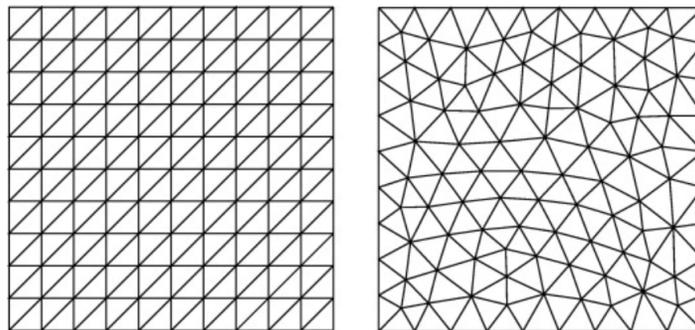


Figura 3.2: Malla estructurada (izquierda) vs Malla no estructurada (derecha) [5].

Ambos tipos de estructura de malla tienen ventajas respecto a la otra: las mallas estructuradas suelen obtener mejores resultados (convergencia y precisión) que las mallas no estructuradas, aunque hay que adaptarlas a la geometría del problema, que en algunos casos es muy compleja e imposibilita este proceso, siendo, en un principio, solamente aplicables a aquellas geometrías que permitan transformarlas en un rectángulo, para casos 2D, y en hexaedros, para casos 3D. Por lo general, las mallas estructuradas necesitan de mucha interacción humana para poder conducir las y no serán interesantes para aquellos problemas donde el tiempo de ingenieros supere el umbral donde sea más atractivo el mallado automático generado por un algoritmo.

Por otro lado, la combinación de ambas estructuras de malla descritas (estructurada y no estructurada) en un mismo volumen de control, da como resultado lo que se conoce como **mallas híbridas** [6]. Estas mallas se componen de agrupaciones estructuradas y agrupaciones no estructuradas. En este tipo de mallas, según la conexión entre los nodos que unen ambas distribuciones se pueden dividir en **mallas conformes** y **mallas no conformes** (Figura 3.3): en las mallas conformes los nodos y caras de las celdas contiguas coinciden, mientras que en las no conformes las caras y nodos de las celdas contiguas de ambos bloques no coinciden y se necesita de métodos de interpolación de la solución del fluido, lo que suele provocar divergencias en la solución y pérdidas de precisión.

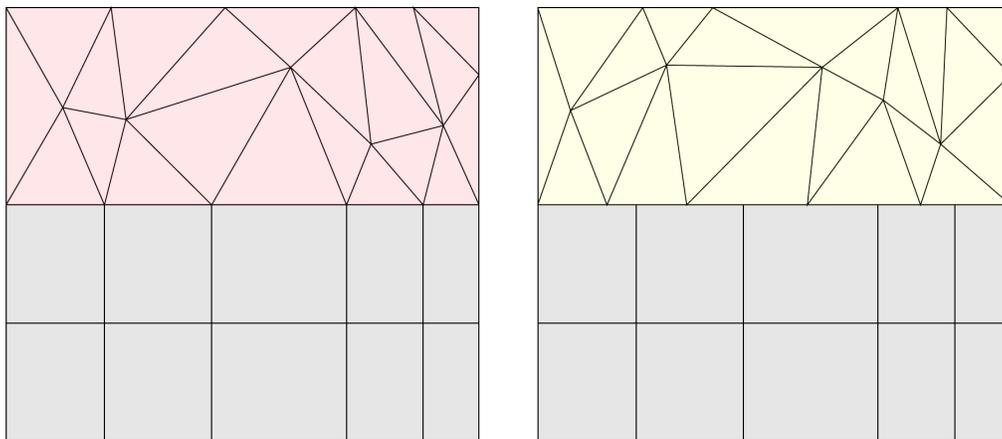


Figura 3.3: Malla conforme (izquierda) vs Malla no conforme (derecha) [6].

Tal y como se ha comentado en líneas anteriores, existen diferentes tipos de elemento para mallar el dominio. Los elementos empleados en mallas 2D son principalmente de dos tipos:

- **Elementos triangulares:** son elementos muy flexibles que permiten adaptar la malla a geometrías muy complejas. Son ampliamente utilizados en mallas no estructuradas generadas por algoritmos y en aquellos dominios donde el flujo no presenta una dirección claramente definida.

- **Elementos cuadriláteros:** son elementos menos versátiles que los anteriores. Estos elementos son propios de las mallas estructuradas donde la geometría del dominio a mallar lo permite. En zonas donde el flujo presenta una única dirección bien definida es recomendable su uso, como sería el caso de conductos como el eyector.

Para asegurar una buena calidad de la malla se deben de seguir ciertas premisas que ayudarán en la convergencia del caso y a conseguir una solución más precisa [6]:

- El tamaño de las celdas contiguas no puede cambiar de forma muy brusca. Generalmente se establece que la distancia entre los nodos consecutivos no aumente en más de un 20 % o 30 % , aunque siempre existen excepciones. Este aspecto es fundamental en la transición de bloques o en mallados de capa límite. Cuanto más progresivo sea el crecimiento de la malla la solución será de mayor calidad, a expensas de aumentar el coste computacional. Hay que llegar a un compromiso entre ambos aspectos y evitar una inversión excesiva de recursos en zonas que no son relevantes.
- Las celdas no deben ser muy alargadas. En este apartado cobra importancia el conocido *aspect ratio* que se define como el cociente entre el eje más largo de una celda y el más corto. Los valores que habitualmente se toman como referencia son relaciones de aspecto menores de 10 en el caso donde los elementos estén orientados en la dirección del flujo y menor a 3 en caso donde los elementos se sitúen en la dirección perpendicular al flujo. Una excepción es en la zona de la capa límite, donde se pueden llegar a tolerar relaciones de aspecto mucho más elevadas, incluso superando relaciones de 100 según algunos autores, siempre en la dirección del flujo.
- Las celdas no deben de estar muy deformadas. Esto es lo que se conoce como *skewness* y se habla de la ortogonalidad de un elemento, es decir, cuanto menos regular es un elemento el error de discretización tiende a aumentar. Una forma de determinar la deformación por parte de los códigos es basarse en los ángulos máximos y mínimos que se forman en las esquinas de los elementos. Para el caso de celdas hexaédricas, un valor típico que suele limitarse como máximo de deformación es 0.85, aunque será recomendable una deformación mucho menor en todos los elementos de la malla.
- La capa límite, por sus características, debe tener un tratamiento especial. Esto es debido a los grandes gradientes de velocidad que se dan en esta zona al cumplirse la condición de no deslizamiento. El mallado en esta zona debe refinarse (con una mayor densidad de elementos) manteniendo el criterio de tamaño según la distancia adimensional y^+ del método que se use. Dicho parámetro responde a la Ecuación 3.1 y se podrá consultar su valor en el postprocesado de la malla, ya que el programa usado para los cálculos CFD (Ansys Fluent) permite su obtención directa:

$$y^+ = u_\tau \cdot \frac{y}{\nu} \quad (3.1)$$

En la Ecuación 3.1 u_τ corresponde a la velocidad de fricción, y corresponde a la distancia a la pared y ν corresponde a la viscosidad cinemática local del fluido.

Otras zonas que deben tener un tratamiento especial son aquellas cercanas a las ondas de choque u otras discontinuidades que induzcan fuertes gradientes.

- La orientación de las celdas debe realizarse de acuerdo a la dirección del flujo, es decir, se obtienen mejores resultados cuando las caras de los elementos que conforman la malla son perpendiculares a dicha dirección. Cuando la dirección del flujo es oblicua a las caras de las celdas suelen darse problemas de difusión numérica.

Modelos de turbulencia

Una cuestión que cobra gran importancia en la resolución de los problemas de circulación de flujo es la turbulencia, en concreto las escalas del flujo turbulento que se resuelven para la obtención de la solución final. Antes de entrar en el tratamiento de la turbulencia, es importante conocer cuando el flujo se considera turbulento y que características presenta.

Un flujo turbulento [22] se caracteriza por ser irregular, con no linealidades, aleatorio y caótico. En los flujos turbulentos, la energía disponible tiende a acelerar la homogeneización en el interior del fluido, tanto en el intercambio de masa, momento y energía, lo que se conoce como difusividad. Por otro lado el flujo turbulento es rotacional, es decir, el fluido presenta una velocidad angular finita con la formación de vórtices tridimensionales. La expresión que define la rotacionalidad de un flujo es la que viene dada por la Ecuación 3.2:

$$\vec{\omega} = \nabla \wedge \vec{U} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (3.2)$$

La turbulencia siempre es tridimensional olvidando sus orígenes, siendo imposible de recuperar un tiempo anterior a partir de uno presente. Para poder mantenerla se requiere de un aporte constante de energía, pues la turbulencia se disipa rápidamente cuando la energía cinética se convierte en energía interna debido a los esfuerzos tangenciales viscosos.

Se puede afirmar así, que la turbulencia es un estado del flujo, no una propiedad del mismo, lo que provoca que los resultados obtenidos al repetir un ensayo sean distintos bajo las mismas condiciones.

El flujo turbulento presenta un espectro continuo y coherente de escalas temporales y de longitud donde las escalas más grandes están condicionadas por la geometría del

problema y las más pequeñas determinadas por la viscosidad. Esta clasificación se puede observar en la Figura 3.4. Este fenómeno fue estudiado por Richardson a principios del siglo XX quién afirmó que un flujo turbulento presenta grandes torbellinos que son inestables y eventualmente se rompen y dan lugar a torbellinos más pequeños y este proceso se repite, pasando la energía de las escalas más grandes de movimiento a las pequeñas hasta llegar al punto donde las escalas son lo suficientemente pequeñas para que la viscosidad pueda disipar la energía cinética de forma efectiva.

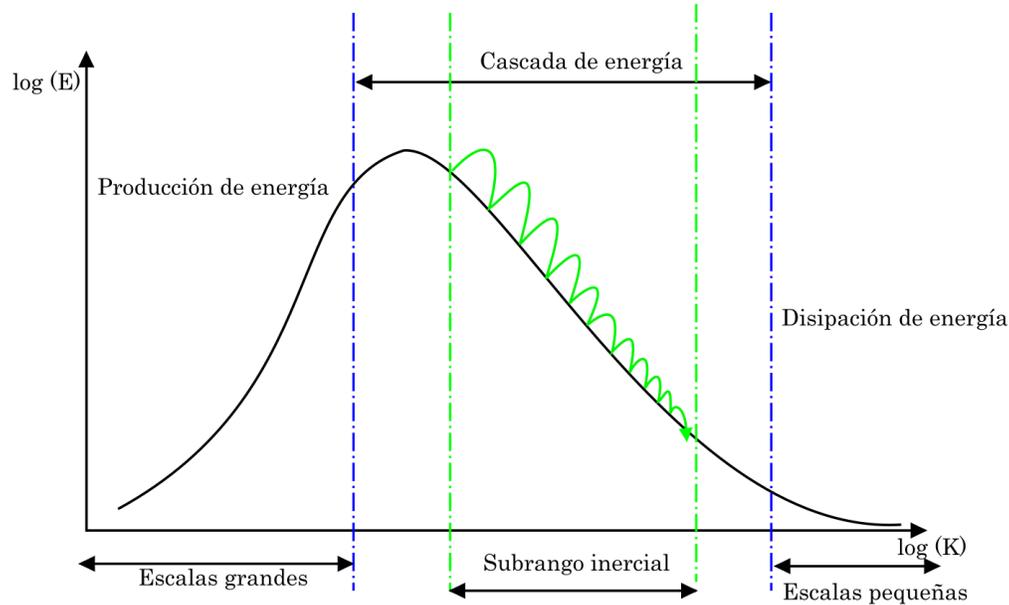


Figura 3.4: Cascada de energía para un flujo turbulento.

La resolución de la turbulencia es sin duda uno de los factores que van a consumir una mayor parte de los recursos computacionales. Se distinguen varias aproximaciones para resolver el problema de la turbulencia [21]:

- **DNS** (*Direct Numerical Simulations*): en esta simulación las ecuaciones de Navier-Stokes se resuelven numéricamente sin emplear ningún modelo de turbulencia, es decir, todas las escalas temporales y espaciales de la turbulencia se resuelven, desde las escalas integrales (más grandes) asociadas a la energía cinética hasta las escalas disipativas (más pequeñas) de Kolgomorov. Estas simulaciones requieren de una gran cantidad de recursos computacionales y pueden llevar meses e incluso años para culminar la simulación, por lo que habitualmente están reservadas para casos muy concretos en los que se requiere de una precisión extrema.
- **SRS** (*Scale-Resolving Simulations*): en esta simulación la variante más representativa es **LES** (*Large Eddy Simulation*), donde se emplea un modelo matemático para resolver la turbulencia. Al igual que en el anterior se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes, pero solamente para las escalas espaciales y temporales más

grandes, mientras que las más pequeñas se modelan. Este método está mucho más extendido que el DNS en un amplio abanico de aplicaciones ingenieriles (combustión, acústica, capas límite...) por su coste computacional menor, aunque también requiere de gran potencia computacional para abordar simulaciones en intervalos temporales asequibles.

- **RANS** (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations*): este método considera un promediado del tiempo para las ecuaciones del flujo en el fluido. Se basa en la descomposición de Reynolds, donde una cantidad instantánea se descompone en su cantidad de tiempo promediado y fluctuación. Se emplea para obtener una aproximación de la solución promediada del tiempo para las ecuaciones de Navier-Stokes, es decir, todas las escalas de turbulencia se modelan mediante el uso de ecuaciones de transporte adicionales de las que se hablará en los siguientes apartados. La solución que se obtiene es aproximada a la real, ofreciendo una idea de lo que va a pasar con un uso mucho más reducido de recursos computacionales, por lo que los tiempos de cálculo son mucho más cortos para un mismo equipo y es el que ha sido empleado para la simulación del eyector.

También se habla de combinaciones entre ellas como sería DES (*Detached Eddy Simulations*), que se trata de una combinación de DNS+LES.

Como se ha comentado anteriormente, el método RANS [23] modela todas las escalas de turbulencia para llegar a obtener una solución al problema de flujo planteado. Su ecuación típica es la que se muestra en la Ecuación 3.3 y 3.4:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}'_i \bar{u}'_j) \quad (3.4)$$

donde \bar{u}_i es la velocidad principal del flujo, u'_i es la fluctuación de la velocidad, ρ es la densidad del fluido y ν es la viscosidad cinemática. A su vez el último término es el tensor de Reynolds y se puede expresar por el término de la Ecuación 3.5

$$\tau_{ij} = \bar{u}'_i \bar{u}'_j \quad (3.5)$$

que es un tensor simétrico con seis términos independientes. Se puede observar de las Ecuaciones 3.3 y 3.4 que existe un mayor número de variables no conocidas (presión, tres componentes de velocidad y seis tensiones) que ecuaciones disponibles para solucionar el problema (continuidad y Navier Stokes). Este es el conocido como el problema de "cierre" que se reduce con la modelización del tensor de Reynolds.

La aproximación más popular para resolver el problema del cierre es el de *Boussinesq eddy-viscosity*. En esta analogía la viscosidad molecular y el tensor de Reynolds turbulento se modulan según las Ecuaciones 3.6 y 3.7 respectivamente:

$$\tau_{ij} = \bar{u}'_i \bar{u}'_j = \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} - \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.6)$$

$$k = \frac{1}{2} \bar{u}'_i \bar{u}'_i = \frac{1}{2} (\bar{u}'_1{}^2 + \bar{u}'_2{}^2 + \bar{u}'_3{}^2) \quad (3.7)$$

donde k es la energía cinética turbulenta y ν_t es la turbulencia o la viscosidad de torbellino que no es constante.

Sustituyendo la Ecuación 3.6 en la Ecuación 3.4 se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] \quad (3.8)$$

Los análisis dimensionales dictan que la incógnita ν_t debe de ser proporcional al producto de la velocidad característica V_t y de la longitud característica de la escala L_t . Es en este punto donde se diferencian los diferentes modelos [23] para la aproximación del problema basados en cero, una y dos ecuaciones y que se pueden encontrar en Ansys:

- **Spalart-Allmaras:** se trata de un modelo de una ecuación en el que se ha formulado una ecuación de transporte adicional para el cálculo de la energía cinética (k). Para ello se ha reformulado la distribución de las escalas grandes (L), definida algebraicamente y avalada por datos experimentales. Sus usos se basan principalmente en el estudio de flujos sobre perfiles alares, obteniendo buenos resultados. Para estudios de flujos con vorticidades 3D crea una gran difusividad por lo que se desaconseja su uso.
- **Standard k- ϵ :** Se trata de un modelo de dos ecuaciones, donde además de las ecuaciones propias de Navier Stokes se añaden dos ecuaciones de transporte adicionales para dos propiedades propias de la turbulencia. El método k- ϵ es el modelo de 2 ecuaciones más extendido y con el que más se ha trabajado, por lo que se ha mejorado mucho en los últimos años. La viscosidad turbulenta cinemática se rige por la Ecuación 3.9:

$$\nu_t = C_\eta \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.9)$$

La energía turbulenta cinemática (k) viene dada por la Ecuación 3.10:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{(\nu + \nu_t)}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \epsilon + \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.10)$$

El ratio de disipación turbulenta (ϵ) viene dado por la Ecuación 3.11:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{(\nu + v_t)}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.11)$$

donde $\sigma_k = 1.0$ y $\sigma_\epsilon = 1.3$ son los números de Prandtl para k y ϵ respectivamente. El resto de constantes reciben otros valores según el modelo.

El modelo estándar $k - \epsilon$ obtiene resultados muy buenos en flujos turbulentos cerca de pared, aunque no es apto para la simulación de flujos con gradientes adversos de presión o con tensiones extra.

- **k- ϵ realizable:** este modelo nace como una de las mejoras y modificaciones realizadas al modelo $k - \epsilon$. Se basa en la satisfacción de las restricciones de la realizabilidad en las tensiones normales de Reynolds y la desigualdad de Schwartz para las tensiones turbulentas de cizalladura. En este punto la constante C_μ del modelo $k - \epsilon$ estándar deja de ser una constante y se calcula por una ecuación de torbellino viscoso. Las mejoras respecto al anterior se observan en el cálculo de chorros y mezclas de capas, canales, capas límite y flujos desprendidos.
- **k- ϵ RNG:** es una modificación del modelo clásico $k\epsilon$ con mejores predicciones en recirculaciones y flujos desprendidos. Las ecuaciones características son las mismas que para el original (Ecuaciones 3.10 y 3.11), aunque el coeficiente $C_{\epsilon 2}$ se calcula según la Ecuación 3.12:

$$C_{\epsilon 2} = C_{\epsilon 2} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta_1 \eta^3} \quad (3.12)$$

Los resultados obtenidos para flujos separados son mejores que los obtenidos para el modelo original, pero se producen errores en la predicción de flujos con aceleraciones.

- **k- ω :** Este modelo nace como una mejora y de las constantes modificaciones realizadas al primer modelo propuesto por Kolmogorov. Las ecuaciones que gobiernan el problema son la de energía cinética (k), Ecuación 3.13, y la del ratio de disipación (ω), Ecuación 3.14.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \sigma^* \frac{k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \beta^* k \omega + \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \sigma \frac{k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \beta \omega^2 + \frac{\sigma_a}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + a \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.14)$$

Cada constante toma un valor cerrado para el modelo. El modelo $k - \omega$ es superior que el $k - \epsilon$ en muchos campos y es el empleado para la resolución del estudio del eyector. Dicho modelo obtiene una mayor precisión para capas límite con

gradientes adversos de presión, además puede integrarse mejor con la subcapa viscosa sin la necesidad de incluir ninguna función de amortiguación. Las últimas actualizaciones del modelo, con la versión de Wilcox (2006) mejoran el modelo y obtiene mejor resultados para flujos libres de cizalladura y desprendidos. Por contra, el modelo no es indicado para usar en flujos libres, como chorros.

- **SST** (*Shear Stress Transport*): se trata de uno de los modelos de turbulencia más avanzados y fue desarrollado por Menter. Este modelo combina las ventajas del modelo $K - \epsilon$ y $k - \omega$ en la predicción de flujos aerodinámicos, especialmente en la simulación de capas límite bajo gradientes adversos de presión. Su uso se ha validado bajo innumerables casos (alabes de turbina, gradientes de presión nulos y adversos, etc) lo que lo convierte en idóneo para ser empleado en la simulación del eyector.

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno en un problema se definen para imponer los límites de las variables que van a regir el problema. Estas condiciones de operación van a gobernar tanto los comportamientos a nivel microscópico como a grandes escalas. Estas condiciones van a ser conocidas en la frontera donde se apliquen y deben satisfacerse por las ecuaciones de conservación. Las condiciones de contorno aplicadas a la simulación del eyector son las siguientes:

- **Presión a la entrada:** esta condición permite fijar la presión estática a la entrada, la temperatura en la frontera, la dirección del flujo y el sentido del mismo mediante el signo (el signo negativo hace referencia al flujo que abandona el dominio, mientras que el positivo hace referencia al que entra al dominio). Es una de las condiciones indispensables para definir el problema y en la que los parámetros son fácilmente medibles y por ello conocidos.
- **Presión a la salida:** esta condición funciona de forma análoga a como lo hace la condición de presión a la entrada, donde los parámetros de presión y temperatura son igualmente conocidos.
- **Simetría:** es una condición muy útil a la hora de simplificar la geometría de un dominio y reducir los tiempos de cálculo. Esta condición se aplica en los ejes de simetría que existen en el volumen de control, de forma que la simulación del comportamiento del flujo a un lado del eje se extrapola al lado contrario.
- **Eje:** esta condición se utiliza cuando existe en la pieza un eje de revolución y funciona de una forma muy similar a la condición de simetría, extendiendo lo que ocurre a un lado del eje al contrario, con lo que se ahorra una gran cantidad de operaciones de cálculo al considerar solamente un dominio que será la mitad al total en caso de existir un eje.

- **Pared:** permite definir los límites de la frontera del conducto por donde va a circular el flujo. En la pared se debe cumplir la condición de velocidad nula (condición de no deslizamiento). Además, la pared debe de ser impermeable y adiabática, impidiendo el intercambio de calor con el exterior, en el caso del estudio del eyector, aunque estos parámetros se pueden personalizar.
- **Interior:** hace referencia a la superficie, o volumen, que encierra la pared, es decir, el dominio por donde va a circular el flujo y donde se van a aplicar las ecuaciones de conservación.

3.1.2. Solver

Para la resolución del problema es necesario conocer que ecuaciones son las que se resuelven y rigen el problema. Este apartado contiene una breve introducción de dichas ecuaciones y cual es el proceso de resolución de un código comercial.

La ecuación general de transporte de un flujo [24] es la Ecuación 3.15:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varphi\vec{u}) = \text{div}(\Gamma_\varphi\text{grad}(\varphi)) + S_\varphi \quad (3.15)$$

El primer término corresponde a la variación temporal, el segundo al término convectivo, el tercero al difusivo y finalmente el último de ellos al término fuente.

Si la simulación se resuelve mediante el método de los volúmenes finitos, implementado en *Ansys Fluent*, se plantea la forma integral de las ecuaciones de conservación y conservativa en volúmenes de control, de forma que la ecuación de transporte integrada toma la forma de la Ecuación 3.16

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V_c} \rho\varphi dV + \iint_{S_c} \rho\varphi\vec{u} \cdot d\vec{A} = \iint_{S_c} \Gamma_\varphi \nabla\varphi \cdot d\vec{A} + \iiint_{V_c} S_\varphi dV \quad (3.16)$$

que si se aplica a cada celda queda como:

$$\frac{\partial(\rho_p\varphi)}{\partial t} V + \sum_f^{N_f} \rho_f\varphi_f\vec{u}_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_f} \Gamma_{\varphi,f}(\nabla\varphi)_f \cdot \vec{A}_f + S_{\varphi,P}V \quad (3.17)$$

donde el subíndice f hace referencia a las propiedades de las caras que se relacionan con los centroides de cada una de las celdas (Φ_p) y de las vecinas a la misma Φ_{nb} hasta finalmente obtener, haciendo uso de métodos de discretización, la Ecuación 3.18:

$$a_p \varphi_p = \sum_{nb}^{N_{nb}} a_{nb} \varphi_{nb} + b \quad (3.18)$$

Con ello se forma un sistema de ecuaciones algebraicas de tantas ecuaciones como celdas haya en el problema que se soluciona mediante iteración.

La forma de solucionar el sistema de ecuaciones algebraicas es el que va a determinar el tipo de *solver* distinguiéndose principalmente dos tipos [24]:

- **Pressure-based:** este método se formuló para poder resolver problemas de fluido incompresible y poder simularlos, pero en la actualidad se ha extendido también para resolver flujos compresibles y es el que se ha empleado para la simulación del eyector en este estudio.

En este método ρ se obtiene a partir de las ecuaciones de continuidad y de momento, mientras que la p se obtiene a partir de las ecuaciones de estado. Las ecuaciones de transporte se resuelven de forma secuencial, segregada o desacoplada, a excepción de los términos p y v , que pueden resolverse a la vez, ocupando más memoria RAM y con menos iteraciones para alcanzar la convergencia, o con un método predictor-corrector. A su vez, permite formularse de forma verdaderamente estacionaria, eliminando el término temporal.

- **Density-based:** este método nació para poder resolver problemas de flujo compresible, aunque al igual que el anterior, actualmente su uso se ha extendido para resolver problemas de flujo incompresible.

Para este método ρ se calcula a partir de la ecuación de continuidad y p de la ecuación de estado. Las ecuaciones de transporte, a excepción de las turbulentas, se resuelven simultáneamente. Por otro lado, es intrínsecamente transitorio, pudiendo obtener un estacionario en proceso. Además permite una formulación explícita del avance temporal, con lo que los procesos necesitan menos memoria RAM, eliminando las subiteraciones temporales y sin restricciones de Courant-Friedrichs-Lewy para el término temporal.

Finalmente, para determinar si la solución ha convergido se emplean los residuales y variables de interés que el usuario ha monitorizado.

En el caso de los residuales se distingue entre los residuales obtenidos con el método *Pressure-based*

$$R^\varphi = \sum_{celdas} \left[\sum_{nb}^{N_{nb}} a_{nb} \varphi_{nb} + b - a_p \varphi_p \right] \quad (3.19)$$

y los residuales obtenidos por el método *Density-based*

$$R^\varphi = \sqrt{\sum_{\text{celdas}} \left(\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right)^2} \quad (3.20)$$

Después de normalizarlos para poder juzgarlos se definen unos umbrales generalizados como criterio de convergencia. Para la continuidad se atribuye un límite de $R_{norm}^\varphi < 10^{-3}$ para asegurar la convergencia, y para el resto de ecuaciones $R_{norm}^\varphi < 10^{-6}$.

Además de los residuales, existen otros indicadores para verificar la convergencia de un caso: antinaturalidades en el flujo al obtener los contornos de velocidad, presión, etc. Ecuaciones globales de conservación (continuidad, cantidad de movimiento) donde se comprueba entre iteraciones si su variación es inferior al 0.1 % se puede concluir la convergencia. Finalmente, variables de interés monitorizadas que seguirán el mismo criterio que el anterior, si su variación es inferior al 0.1 % se podrá concluir la convergencia del caso.

3.1.3. Postprocesado

El postprocesado es la última de las fases del CFD donde se analizan los datos obtenidos al resolver el problema de flujo. Para poder postprocesar los datos obtenidos se puede emplear programas específicos para CFD que pueden venir integrados en el mismo solver, lo que supone una mayor comodidad para tratar la información, o ser externos al solver, en el caso de requerir una información específica o un tipo de presentación que el programa no ofrece, lo que supone problemas de compatibilidad y costes extra en las licencias de dichos programas.

Generalmente la solución también se puede importar a entornos matemáticos o hojas de cálculo para tratar con una mayor comodidad la información extraída.

Uno de los pasos más importantes, y que no es habitual que se realice en el proceso, es comprobar la independencia de la malla generada, con tal de verificar que la solución alcanzada es correcta. Para comprobar que la malla no es fuente de error se debe de incrementar el número de celdas en un factor de 1.5 veces en cada dirección respecto a la malla base y asegurar que los resultados obtenidos para las variables monitorizadas no oscilen en un valor superior al 1 % entre mallas sucesivas. Se debe respetar que la densidad de elementos ha de ser mayor en aquellas zonas con elevados gradientes en las propiedades (velocidad, presión, temperatura, capas límite, etc).

Finalmente, el último paso del postprocesado y del CFD es la presentación de los resultados obtenidos. Dicha presentación pasa por:

- Generación de contornos de magnitudes que resulten de interés a lo largo del dominio de control con una gamma de colores adecuada para facilitar su comprensión y con una escala de límites adecuados para los valores que se van a tratar.

- Perfiles de magnitudes escalares y su evolución a lo largo del dominio mediante la generación de planos o líneas auxiliares.
- Generación de líneas de corriente (*streamlines*) para la visualización de la trayectoria seguida por el flujo.
- Extracción de datos para poder procesarlos con hojas de cálculo o herramientas externas. Además de la obtención de variables derivadas que pueden ser de utilidad, generalmente variables adimensionalizadas y representativas del problema.
- Representación de la malla para observar posibles discontinuidades y causas de divergencia en la solución.
- Generación de isolíneas que permitan definir contornos con magnitudes del mismo valor.

Capítulo 4

Generación y simulación de la geometría de referencia

Este capítulo persigue explicar todo el proceso seguido para la simulación del eyector de geometría variable y aerospike, desde la generación de la geometría, mallado, condiciones de contorno y modelos empleados para la resolución del caso. Cabe destacar que el objetivo final es poder observar el funcionamiento del eyector para diferentes condiciones de contorno, especialmente para aquellas condiciones que sitúan al eyector fuera de su punto de funcionamiento y donde se produce una gran caída en sus prestaciones, como se sabe de estudios anteriores, y finalmente, establecer una comparativa entre ambas configuraciones. Los resultados obtenidos, comparaciones y conclusiones se desarrollarán en capítulos posteriores.

4.1. Generación de la geometría

4.1.1. Eyector de geometría variable

Para la generación del dominio del eyector de geometría variable se parte de una geometría preliminar típica, que en el estudio estático realizado, es una geometría semejante a la que resultaría al estudiar un eyector de tobera convergente-divergente convencional de geometría fija. El eyector se muestra en la Figura 4.1, donde se distinguen las partes genéricas de un eyector mencionadas en la Sección 2.1, además de la presencia de la aguja, que va a servir como parte móvil para alterar la forma básica del eyector en los pasos futuros. Cabe destacar que el modelo presenta en los cambios de sección del conducto bordes sin suavizado. Esta decisión se toma por simplificación de la geometría y por tratarse de un factor que no es importante para el estudio realizado.

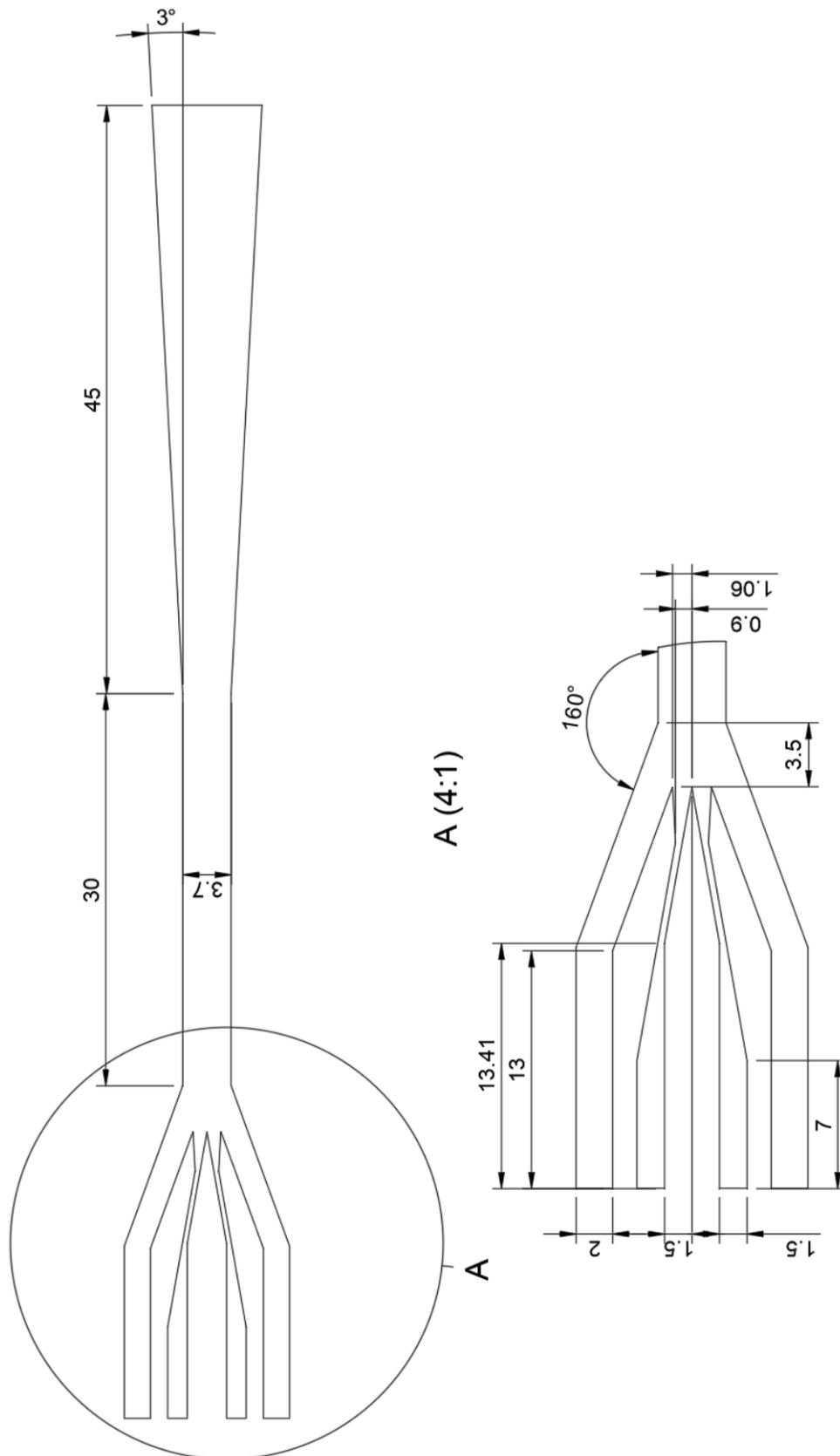


Figura 4.1: Plano del eyector de geometría variable para el caso base. Nota: todas las cotas están expresadas en milímetros.

Es importante destacar que la geometría del eyector tiene que estar bien parametrizada, de forma que un cambio en alguna de sus cotas no produzca grandes distorsiones en el modelo y modifique algún parámetro que resulte crítico en las prestaciones del eyector. Se conoce del estudio realizado en el Trabajo de Fin de Máster de Alberto Ponce Mora [25] que las prestaciones del eyector tienen una gran dependencia con tres cotas en su geometría. Estas tres cotas son el radio de la salida de la tobera principal, el diámetro del conducto de mezcla y, en menor medida, la longitud de la cámara de succión, resaltadas en la Figura 4.2.

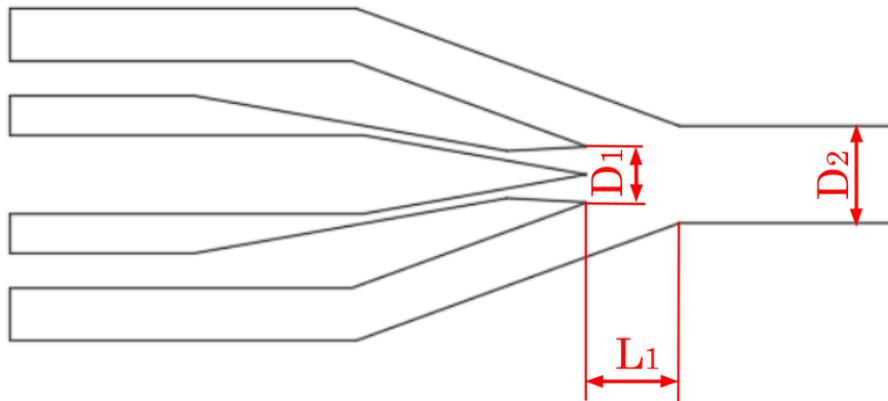


Figura 4.2: Cotas críticas para la prestación del eyector. D_1 : diámetro de la salida de la tobera principal, D_2 : diámetro del conducto de mezcla, L_1 : longitud de la cámara de succión.

Finalmente, cabe destacar que solamente se va a diseñar la mitad superior del eyector al existir un eje de simetría que permitirá extender los resultados obtenidos en este dominio a la mitad inferior, lo que supondrá un ahorro de recursos computacionales y tiempos de cálculo en la simulación del comportamiento del flujo.

Con la configuración del eyector de geometría variable se espera poder adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno con el movimiento de la aguja y maximizar en cada momento sus prestaciones en la medida posible.

4.1.2. Eyector aerospike

Al igual que en el caso del eyector de geometría variable se muestra en la Figura 4.3 el modelo base generado para el eyector aerospike. Para el diseño de este modelo se ha tenido en cuenta la geometría de aerospikes empleados para propulsión en motores cohete y estudios anteriores de esta tipología incluidos en ciclos de eyección.

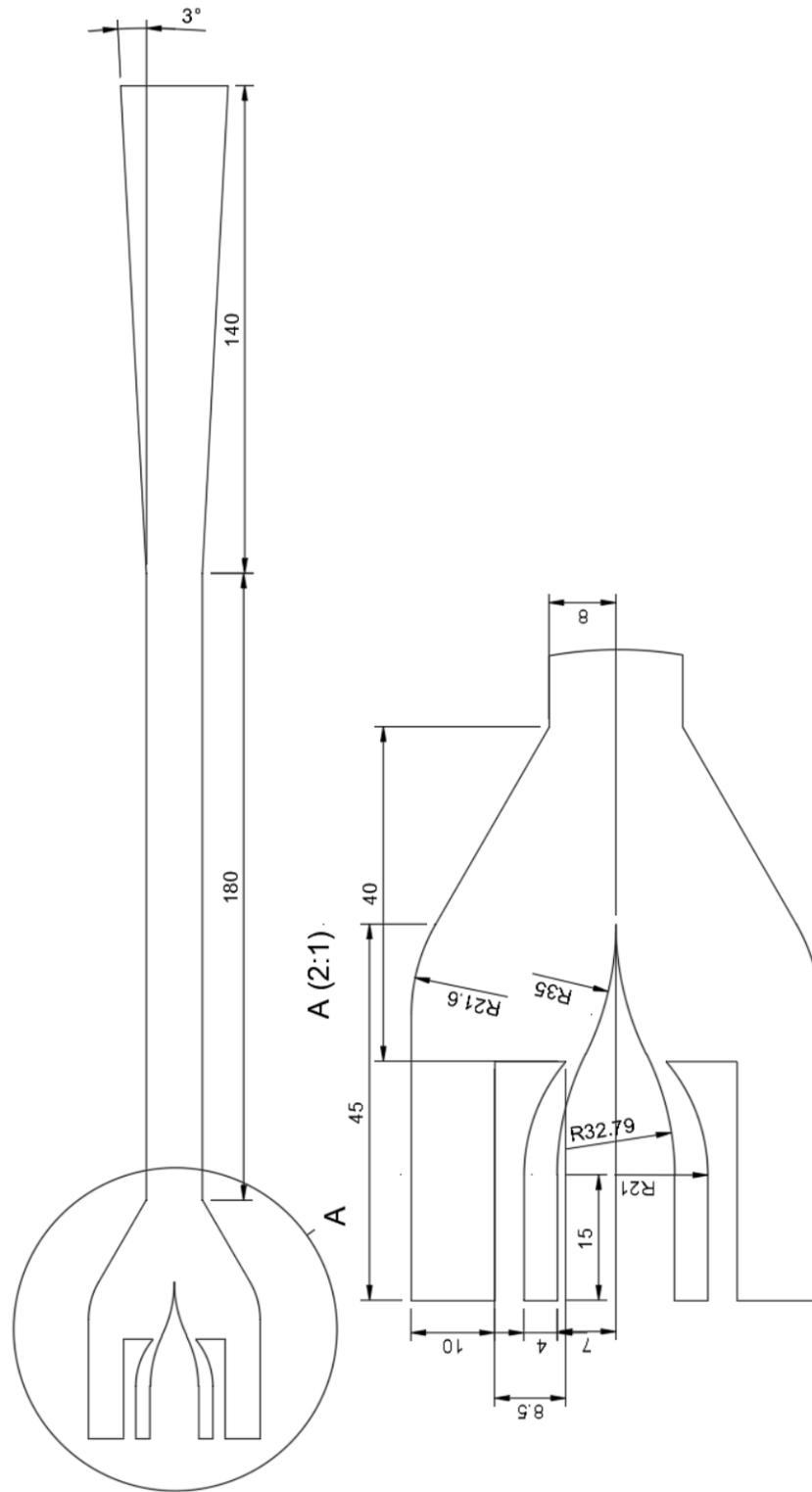


Figura 4.3: Plano del eyector aerospike para el caso base. Nota: todas las cotas están expresadas en milímetros.

Cabe destacar que el aerospike empleado para el diseño es completo, no truncado, pues como se ha comentado en la Sección 2.5, para un cuerpo truncado los estudios muestran que se produce un cambio en el comportamiento del flujo más temprano, induciendo pérdidas en este diseño de tobera, siendo su principal razón de existencia las elevadas temperaturas que se dan en un motor cohete de propulsión y que pueden poner en compromiso la integridad del extremo del aerospike. Esta problemática no ocurre en el caso de estudio, donde las temperaturas máximas alcanzadas rondan los 80°C alcanzados en el colector solar, por lo que se ha optado por este diseño.

Con la configuración de eyector aerospike se espera obtener una respuesta similar de la evolución de las prestaciones del eyector ante las condiciones cambiantes del entorno que la obtenida para el eyector de geometría variable, pero con la ausencia de partes móviles.

4.2. Mallado

A partir de la geometría generada, el estudio trata sobre el comportamiento del flujo que trasiega el eyector en su interior, por lo que el dominio que se va a mallar es la superficie encerrada por las líneas de las Figuras 4.1 y 4.3.

Para ambos modelos del eyector el proceso de mallado es análogo. Es posible realizar una malla estructurada con tal de mejorar la convergencia del caso y la precisión de los resultados obtenidos sin emplear un gran esfuerzo por parte del usuario. Para la realización de dicha malla es necesario dividir el dominio de control en superficies de polígonos de cuatro lados, tal y como se muestra en la Figura 4.4. La división del dominio en Ansys Fluent se hace previamente durante la generación de la geometría, creando una serie de líneas auxiliares que servirán como división de estas superficies. Es especialmente importante la correcta división del dominio para el caso del eyector aerospike, donde los contornos redondeados van a dificultar la generación de la malla estructurada por la adaptación de los elementos rectangulares a las curvas.

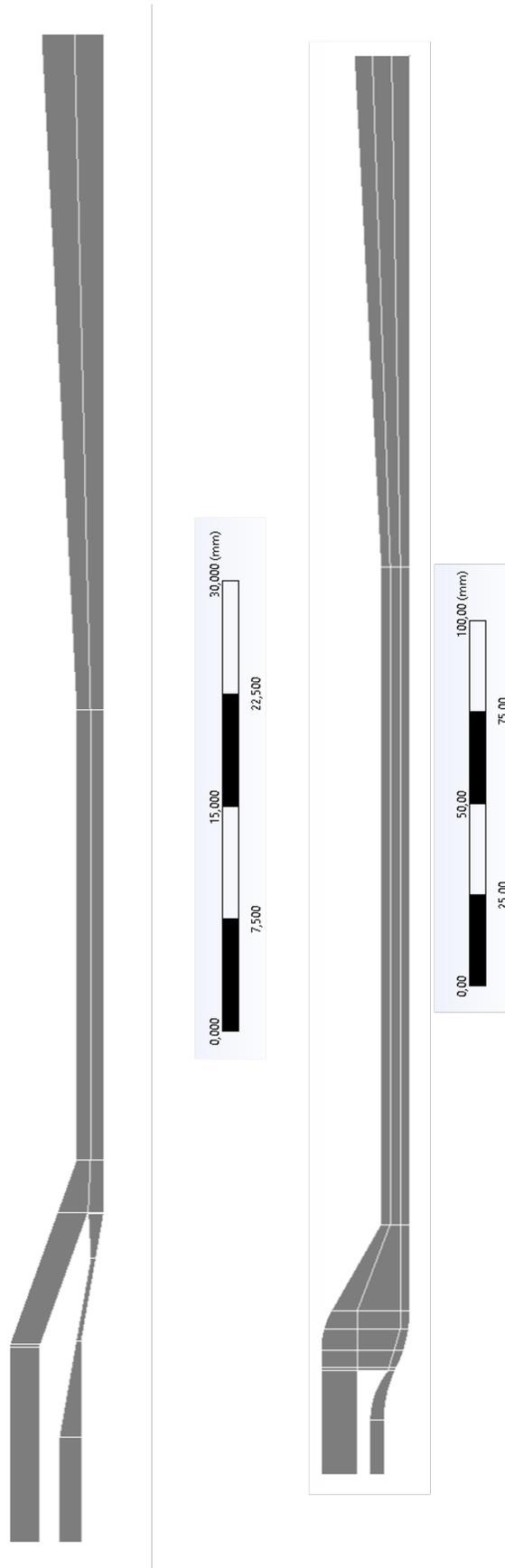


Figura 4.4: Secciones en las que se ha dividido el dominio de control del eyector para realizar la malla estructurada.

Una vez preprocesado el dominio, con la herramienta *Edge Sizing* se establecen las pautas para conducir la malla a lo largo del dominio. Para cada una de las regiones que se han creado se fijan el número de elementos en los que se van a dividir el eje perpendicular y paralelo a la dirección del flujo. Este proceso es minucioso y debe realizarse de forma escrupulosa para evitar distorsiones en la malla, pues las aristas de un mismo bloque horizontal o vertical deben compartir el mismo número de elementos, para evitar que los nodos entre elementos de una región y sus contiguas no coincidan y se genere una malla no conforme que podría llevar a la no convergencia del caso. En este punto se puede refinar a su vez la malla, generando una capa límite para considerar los efectos de pared, aunque para esta simulación no tiene gran influencia en los resultados obtenidos.

Una vez generada la malla se pueden consultar los parámetros característicos de la misma comentados en la Sección 3.1.1, tales como el *aspect ratio*, *skewness* o la ortogonalidad, que ofrecerán una primera idea de la calidad de la malla. Estos parámetros se pueden consultar en la Tabla 4.1:

	Eyector geometría variable	Eyector aerospike
Número de celdas	75096	82810
Calidad de elemento	0.616	0.541
Aspect ratio	3.322	3.617
Skewness	0.031	0.0311

Tabla 4.1: Parámetros característicos de la malla para el eyector de geometría variable y aerospike. Nota: cada uno de los parámetros expresa el promedio en todos los elementos de la malla

En lo que concierne a la relación de aspecto, tal y como se ha comentado en la Sección 3.1.1 los valores habituales que se toman como referencia para una malla donde los elementos están orientados en la dirección del flujo son inferiores a 10, mientras que si están orientados en la dirección perpendicular al flujo han de ser inferiores a 3, con excepciones de la capa límite. En la malla generada para ambas geometrías, los elementos se encuentran orientados en la dirección del flujo, por lo que se cumple, en promedio, esta premisa.

En cuanto a la calidad de los elementos, esta viene determinada por la ortogonalidad de los mismos, es decir, lo regulares que son. Cuanto más cercano sea este valor a la unidad más regulares serán los elementos, aunque un parámetro más representativo de la calidad y regularidad de los elementos es la *skewness*. Este parámetro viene definido por los ángulos máximos y mínimos que se forman en las esquinas de los elementos y se busca que sea cercano a 0, lo que se cumple para ambas mallas.

La malla generada para ambas configuraciones de eyector se muestra en las Figuras 4.5

y 4.6:

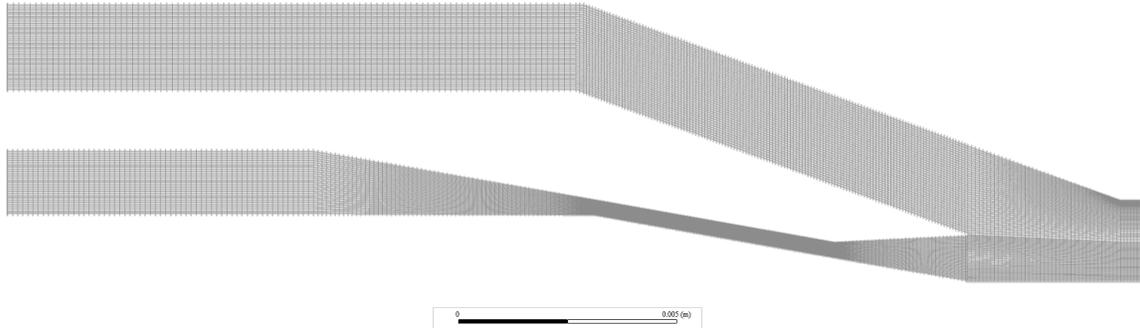


Figura 4.5: Malla eyector geometría variable.

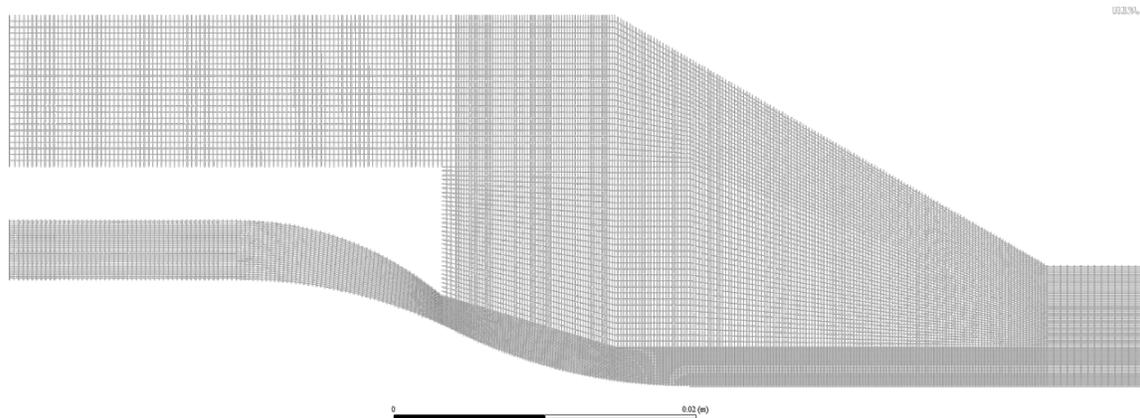


Figura 4.6: Malla eyector aerospike.

Una vez definida la malla para el caso base es importante realizar el estudio de independencia de malla para concluir que los resultados obtenidos por la simulación CFD no son incorrectos por la calidad de la malla. Este proceso suele omitirse y no se le da la importancia que merece en muchos estudios por la cantidad de recursos computacionales y tiempo que requiere. En el proyecto presente era inviable realizar un estudio de independencia de malla para cada una de las geometrías que se ha tratado, tal y como se comprobará en los siguientes capítulos, por ello la malla fue creada con una cantidad modesta de elementos y tras una revisión bibliográfica de los estudios realizados anteriormente, especialmente la tesis doctoral de Alberto Ponce Mora [26], donde se ha trabajado con eyectores de geometría muy similar y el número de elementos de la malla rondaba los 80000.

4.3. Configuración de la simulación

4.3.1. Configuración del caso

Una vez realizado todo el proceso de mallado el caso está listo para imponer las condiciones de contorno y configurarlo para lanzarlo.

Para ambos modelos de eyector se ha considerado un caso bidimensional (2D) y con un eje de simetría que reduce el dominio de cálculo a la mitad. Además el caso ha sido lanzado en serie al no poseer la malla una gran cantidad de elementos, por lo que los tiempos de cálculo no son muy elevados, y el tipo de solver empleado para la resolución de la simulación ha sido *pressure based* ya que, aunque en un principio este fue diseñado para resolver casos donde se trabajaba con flujos incompresibles, en la actualidad su uso se ha extendido a un campo más amplio de regímenes de flujos, siendo adecuado su uso en flujos compresibles en condiciones sónicas o supersónicas, como es el caso del eyector.

4.3.2. Condiciones de contorno

Para poder establecer las condiciones de contorno es necesario especificar la frontera de todo el dominio del eyector, es decir, determinar cual va a ser la entrada del flujo primario, la entrada del flujo secundario, la pared y el eje de simetría. Este proceso se ha concebido desde la herramienta de mallado de Ansys Fluent, donde se ha preestablecido que líneas del dominio delimitaban estas fronteras. En la Figura 4.7 se pueden observar las fronteras delimitadas por un código de colores.



Figura 4.7: Fronteras definidas para el eyector de geometría variable y aerospike. Leyenda de colores: **inlet**, **axis**, **outlet**, **wall**.

Para el eje de revolución del eyector se ha elegido la opción de *axis* para considerar los efectos de simetría. Para las fronteras del eyector se ha establecido la opción de *wall* para considerar los efectos de pared. Para la entrada y salida del flujo se ha fijado la opción de *pressure inlet* y *pressure outlet*, respectivamente. Estas últimas condiciones de contorno permiten imponer la temperatura y presión en esta frontera, lo que permitirá poder monitorizar el gasto másico a lo largo de todo el eyector, cosa muy útil para el estudio que se quiere realizar.

Para fijar la condiciones de presión y temperatura en las entradas y salidas del eyector se ha utilizado la herramienta CoolProp. CoolProp es una librería en C++ que permite establecer correlaciones para conocer las propiedades de los fluidos a partir de ciertas condiciones impuestas.

Las condiciones de temperatura y presión que se han impuesto en dichas fronteras son las que se muestran en la Tabla 4.2:

	Temperatura (K)	Presión (bar)
Entrada primario	351.15	12.365
Entrada secundario	293.15	2.431
Salida	-	5.038

Tabla 4.2: Condiciones de contorno que definen el problema de flujo para ambas configuraciones de eyector.

Para poder determinar las temperaturas de la Tabla 4.2 se ha realizado un estudio de los procesos de intercambio de calor del ciclo de refrigeración típico de una instalación con colector solar. Para ello, se ha supuesto que la temperatura alcanzada en la fuente de calor, es decir, el aceite caliente que circula por los conductos de la instalación del colector solar, es de 358.15 K y el *pinch point* establecido es de 7 K, por lo que la temperatura de entrada al eyector es de 351.15 K, con un margen de 2 K considerando el sobrecalentamiento del gas. La presión a la entrada del primario se obtenido en función de esta temperatura con ayuda de CoolProp.

La temperatura en la entrada del conducto secundario del eyector se consigue para una temperatura alcanzada en el evaporador de 286.15 K y considerando un *pinch point* de 7 K. Al igual que para la presión del primario, con ayuda de la librería Coolprop, se obtiene la presión de entrada en el conducto secundario.

4.3.3. Fluido de trabajo

Tal y como se ha comentado anteriormente (Sección 2.8) el fluido de trabajo va a ser el refrigerante R-600a. Ha sido seleccionado por su bajo impacto ambiental, por tratarse de un refrigerante natural, y por su gran presencia en multitud de aplicaciones domésticas e industriales, lo que demuestra su versatilidad y capacidad para la aplicación de ciclos de refrigeración por eyección.

Las propiedades que definen a este refrigerante se encuentran almacenadas en la base de datos de Ansys, dentro de la biblioteca elaborada por el NIST, lo que facilita su selección. Debe tenerse en cuenta, tal y como se especifica en el manual, que al tratarse de un refrigerante definido en forma de ecuaciones de estado de gas real el caso puede divergir con facilidad, llegando a ser los tiempos de cálculo más elevados e inestables.

4.3.4. Modelo de turbulencia

El modelo de turbulencia elegido para la resolución del caso ha sido el modelo SST $k-\omega$ al ser el más adecuado por su buen funcionamiento en gradientes de presión adversos, su buena integración con la subcapa viscosa y al incorporar las ventajas, tanto del modelo $k-\epsilon$ como del $k-\omega$. La elección de este modelo se ha basado en trabajos anteriores, como el realizado por Alberto Ponce en ciclos de eyección [25].

4.3.5. Solver y factores de relajación

Tal y como se ha comentado en líneas anteriores, el solver empleado para la resolución del caso es el *pressure based*, que permite actualmente resolver simulaciones de flujos compresibles.

Por otro lado, la discretización espacial que se va a establecer en Asys Fluent va a ser para el gradiente *Least Squares Cell Based*, para la presión *Standard* y para la densidad, momento, energía cinética turbulenta, ratio específico de disipación y energía se va a considerar la discretización espacial de segundo orden.

En lo que concierne al modelo de acoplamiento de la velocidad y de la presión se va a considerar el modelo *Coupled*, ya que los fenómenos de compresibilidad van a tener gran importancia en el flujo supersónico que va a transcurrir por el eyector.

Finalmente, para garantizar la convergencia de los casos, los factores de relajación en los cálculos van a ser los que se muestran en la Tabla 4.3. Estos valores se han establecido según la experiencia previa en trabajos anteriores y son relativamente conservadores, con lo que el proceso de convergencia va ser robusto, aunque más lento.

Flow Courant Number	10
Explicit Relaxation Factors	
Momentum	0.25
Pressure	0.25
Under-Relaxation Factors	
Density	0.5
Body Forces	0.5
Turbulence Kinetic Energy	0.4
Specific Dissipation Rate	0.4
Turbulent Viscosity	0.5
Energy	0.5

Tabla 4.3: Controles para asegurar la convergencia del caso.

4.3.6. Automatización del proceso

Para poder inicializar el cálculo de los casos y asegurar la convergencia de los mismos es necesario establecer un proceso automatizado en el que las condiciones de contorno que van a definir el problema van a cambiar progresivamente hasta llegar a los valores deseados. Esto responde a la problemática que plantea el gradiente acusado entre la presión a la entrada y a la salida del eyector, lo que provoca que el caso diverja si se inicializa con estas condiciones.

Para llevar a cabo el proceso de automatización se genera un *journal*, que no es más que un archivo de texto que contiene una macro con los cambios pertinentes en las condiciones de contorno. De esta forma, la presión a la entrada y salida del eyector va a ir variando progresivamente, con un número de iteraciones moderado para cada salto de presiones, hasta finalmente llegar al valor deseado, teniendo en cuenta que las etapas iniciales son las menos estables y los saltos de presión van a ser más suaves. A su vez, se debe mantener un gradiente de presiones positivo, de tal manera que el flujo pueda transcurrir en el sentido entrada-salida del eyector.

Criterios de convergencia

Para asegurar la convergencia, se han establecido como criterios, además de los residuales de continuidad, energía y velocidad, una serie de variables que se han monitorizado para comprobar que su valor no se ve alterado entre iteraciones. Las magnitudes elegidas han sido el gasto másico a la entrada del conducto primario, secundario y salida del eyector, además de establecer un balance entre los gastos másicos, para garantizar que la suma del gasto trasegado por el conducto primario y secundario es igual al gasto en la salida.

Para poder asegurar la convergencia se establece que entre iteraciones no exista variación del gasto másico. Generalmente se garantiza la convergencia para unas 30000 iteraciones, aunque en caso de variar el valor de alguno de los gastos másicos monitorizados se seguirá iterando hasta cumplir esta premisa.

Coste computacional

La simulación de flujo a resolver, para ambas configuraciones de eyector, no es excesivamente compleja al tratarse de un problema en dos dimensiones y considerar un eje de simetría en el eje del conducto principal del eyector, lo que reduce mucho los recursos y tiempos de cálculo del problema. A pesar de ello, el lanzamiento de casos en un ordenador particular es inabordable por elevado número de elementos en la malla y, especialmente, por la gran cantidad de casos lanzados para completar el estudio en los que el fluido de trabajo está definido por ecuaciones de gas real en la librería del NIST, lo que incrementa en gran medida el costo computacional de las simulaciones, además

de favorecer la divergencia. Por todo ello se ha recurrido al *cluster* de cálculo Rigel de la Universidad Politécnica de Valencia [27]. Este superordenador está diseñado para cálculos en paralelo masivo y en su configuración inicial disponía de 72 nodos de la marca Fujitsu BX920S3 sobre un chasis blade BX900S2, incorporando cada blade un total de 18 servidores por chasis, estando formado el cluster por 4 chasis. Esta configuración inicial disponía de una potencia de cálculo de 20.6 TeraFLOPS.

A finales de 2015 se incorporaron un total de 56 nuevos nodos de la marca Bull R424E4, alcanzando a disponer un total de 2176 cores y 9364 Gb de memoria y una potencia de 40 TeraFLOPS.

Actualmente, a la última versión de Rigel, se le han añadido al cluster un total de 27 nodos nuevos de la marca Dell Power R640 (Figura 4.8), consiguiendo aumentar la potencia de cálculo hasta los 50 TeraFLOPS.



Figura 4.8: Nodos Dell Power R640 en el cluster de cálculo Rigel.

Finalmente, la razón por la que se ha optado usar el cluster de cálculo es la posibilidad que ofrece de lanzar varios casos de forma simultánea, de esta forma se sigue un protocolo en el que se genera un archivo *script* que llama al journal mencionado anteriormente y que contiene toda la información necesaria para fijar las condiciones de contorno que van a definir cada una de las simulaciones. Hay que mencionar que se requiere que las estaciones de trabajo del cluster estén disponibles para que los casos puedan ejecutarse.

Con todo ello los tiempos de cálculo para cada simulación están entorno a las 36 horas aproximadamente.

Capítulo 5

Estudio del funcionamiento del eyector de geometría variable

En este capítulo se presenta el estudio realizado para el eyector de geometría variable. Dicho estudio trata la caracterización del funcionamiento del eyector para condiciones de contorno cambiantes, especialmente para conocer sus prestaciones cuando se abandona las condiciones que definen su punto de diseño.

Se tomará como punto de partida el caso base diseñado anteriormente, para el que se optimizarán sus prestaciones en un ciclo de refrigeración con un colector solar. Para realizar esta optimización se modificará la geometría del eyector, manteniendo en una posición fija la aguja móvil que actúa sobre la tobera principal. Una vez optimizada la geometría se variará la condición de presión a la salida del eyector y a la entrada del secundario para observar su evolución ante dichos cambios. Finalmente se mostrará la corrección en las prestaciones en el eyector mediante la aguja móvil que variará su posición para mantener un óptimo en las prestaciones.

5.1. Optimización geométrica

Tal y como se ha comentado en capítulos anteriores (Sección 4.1.1), se conoce de estudios realizados por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia que las cotas más influyentes en las prestaciones de un eyector son el radio de la salida de la tobera principal, el diámetro de conducto de mezcla y la longitud de la cámara de succión. Con ello se pretende realizar un estudio paramétrico que cubra todas las variaciones posibles de estas dimensiones y optimizar el ratio de arrastre (relación entre el gasto másico del conducto secundario y primario) que representa las prestaciones del eyector.

Cabe destacar que el estudio requiere repetir todo el preproceso de una simulación CFD para cada variación en los parámetros geométricos, es decir, la geometría del eyector se

va a ver alterada y por ende la malla va a tener que generarse nuevamente. Es de especial importancia el remallado de la geometría, pues las regiones en las que se ha dividido el dominio del eyector y que van a servir como ayuda para definir la malla estructurada sufren distorsiones cuando se superan algunos límites estructurales y deben volverse a construir. Este proceso es por ello minucioso y requiere de gran ajuste, pues de él va a depender el resto del estudio.

Para obtener los contornos de ratio de arrastre se establecen cambios sutiles en cada uno de los parámetros geométricos con tal de llegar a un resultado preciso en el óptimo de las prestaciones del eyector. Con ello se muestra en la Figura 5.1 los contornos de ratio de arrastre en función de las cotas del diámetro de la salida de la tobera principal y del diámetro del conducto de mezcla. La Tabla 9.1 del Anexo 9.1 muestra los puntos obtenidos en todo el estudio y con los que se ha podido graficar el mapa de contorno.

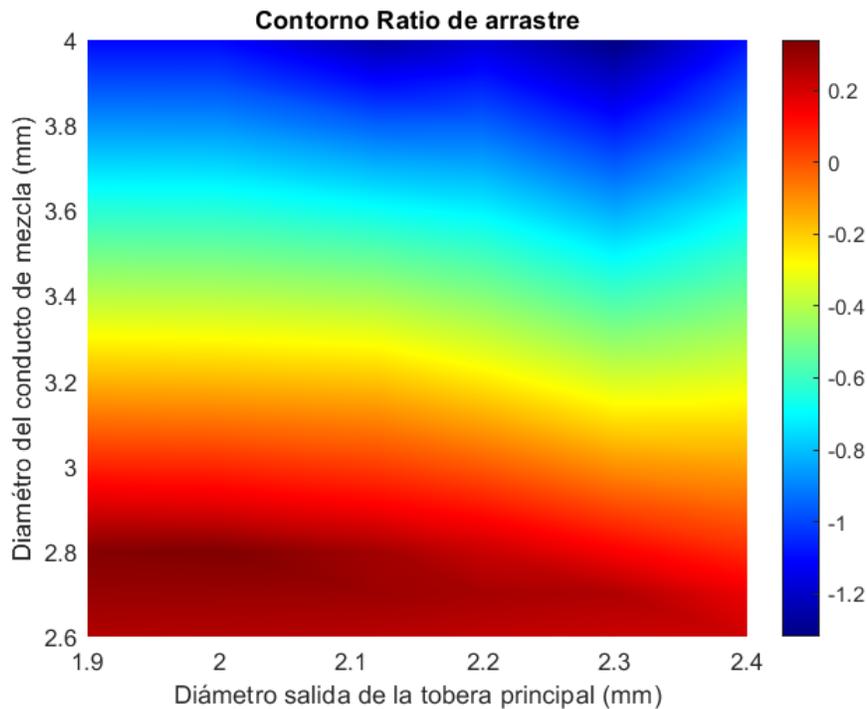


Figura 5.1: Mapa de contorno de ratio de arrastre en función de la longitud del diámetro del conducto de mezcla y el diámetro de la salida de la tobera principal para una longitud de la cámara de succión de 3.5 mm.

Cabe mencionar que la variación en la longitud de la cámara de mezcla es menos influyente que las otras dos dimensiones y el valor que se le dio en un primer momento de 3.5 mm ha sido con el que se ha obtenido el punto óptimo.

A raíz del mapa de contorno se puede conocer cuáles son las dimensiones del eyector para las que se obtiene el óptimo en el ratio de arrastre, además de poder visualizar la influencia de cada uno de los parámetros en las prestaciones del eyector. Se observa

como la geometría que se diseñó en el caso base en la Sección 4.1.1 no es buena para las condiciones de contorno fijadas como punto de diseño (Tabla 4.2) incluso produciendo un mal funcionamiento del eyector, pues el flujo es reverso en el conducto secundario y podría llevar, en el peor de los casos, a la destrucción de la instalación.

Las dimensiones finales del eyector son las que se muestran en la Tabla 5.1 con el óptimo obtenido para el ratio de arrastre.

Zona del eyector	Longitud (mm)
Diámetro del conducto de mezcla	2.0
Diámetro de la salida de la tobera principal	2.8
Longitud de la cámara de mezcla	3.5

Tabla 5.1: Cotas para la geometría óptima del eyector de geometría variable.

5.2. Respuesta fuera de las condiciones de diseño

Tal y como se ha ido repitiendo a lo largo de los capítulos anteriores, la variación en las condiciones del entorno en las que se encuentra la instalación de refrigeración que contiene al eyector producen elevadas pérdidas en las prestaciones del mismo. Esto ocurre especialmente para la aplicación de instalaciones para la refrigeración de uso doméstico con colector solar, sobre la que trata este estudio, pues las condiciones climáticas son muy cambiantes.

En este apartado se va a simular la variación de las condiciones de temperatura y presión en el eyector y como afectan estas al ratio de arrastre y por ende a las prestaciones del eyector.

Es importante para este punto conocer el área en la garganta de la tobera principal, pues llegará el momento para el que la aguja móvil va a tener que actuar para corregir las prestaciones del eyector ante las condiciones cambiantes del entorno (temperatura y presión). Es fácil conocer dicha área a partir de la longitud de la sección constante de la aguja y conociendo la ecuación que define a las rectas del tramo que converge del conducto principal y de la punta de la aguja. Con ello el cálculo del área de la tobera es trivial considerando su geometría como la de una corona circular.

En primer lugar se pasa a estudiar el mapa del eyector para una posición de aguja donde el área de la tobera es de 1.66 mm^2 y variando la presión a la salida del eyector. Las condiciones de contorno fijadas son las de la Tabla 4.2.

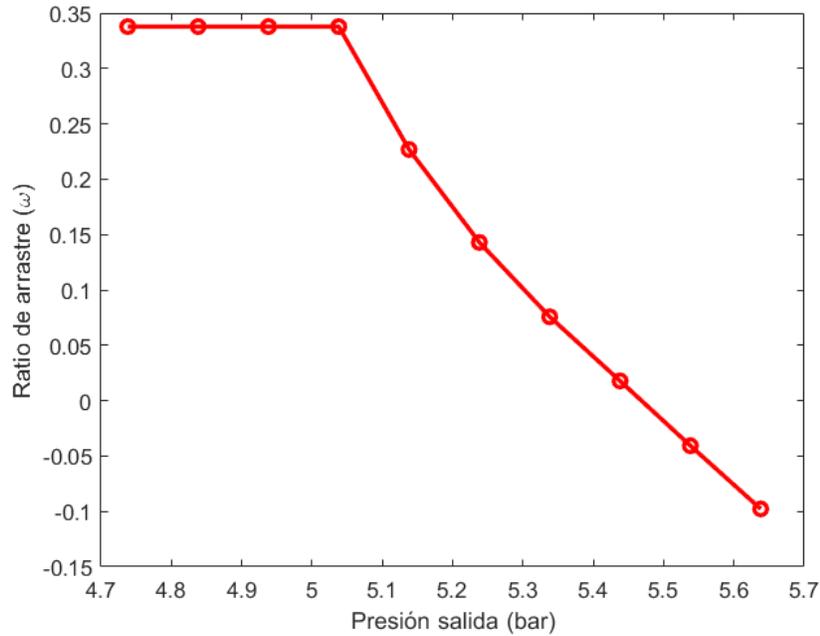


Figura 5.2: Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida para un área de garganta de 1.66mm^2 .

De la Figura 5.2 se aprecia que existe una presión a la salida del eyector para la que valores inferiores, el ratio de arrastre y por consiguiente, las prestaciones del eyector para refrigerar, se mantienen constantes. En cambio, cuando la presión a la salida del eyector supera dicho umbral se produce una caída brusca de las prestaciones.

El fenómeno observado responde al fundamento teórico explicado en la Sección 2.1 sobre los modos de operación de un eyector supersónico. Para presiones inferiores al punto de inflexión el funcionamiento del eyector es idéntico al del punto de diseño y para el que la geometría del eyector ha sido optimizada, pues el eyector se encuentra funcionando en el modo crítico. En este modo el flujo se encuentra en "doble choque", tanto por parte de la corriente que transcurre por el conducto principal como de la corriente que circula por el secundario, pues el flujo ha alcanzado condiciones sónicas y consiguientemente el gasto másico que circula por ambos conductos permanece constante y con ello su relación, es decir, el ratio de arrastre y las prestaciones del eyector. Conforme el gradiente de presiones se hace más adverso a partir del punto de inflexión, el eyector pasa a funcionar en el modo subcrítico, donde únicamente la corriente principal se encuentra en condiciones sónicas y el gasto másico que trasiega por ella se mantiene constante, mientras que el gasto en el conducto secundario se reduce de forma lineal, con lo que la caída de prestaciones se puede representar por la ecuación de una recta. Finalmente llega un punto en el que el flujo entra en retorno y se produce el mal funcionamiento del eyector.

Es importante conocer los contornos de presión, velocidad y temperatura en el eyector

para cada uno de los tres modos de funcionamiento, para analizar los fenómenos que tienen lugar en el flujo.

En primer lugar se muestran los contornos de presión estática en el eyector para los puntos que se especifican en la leyenda de las Figuras 5.3:

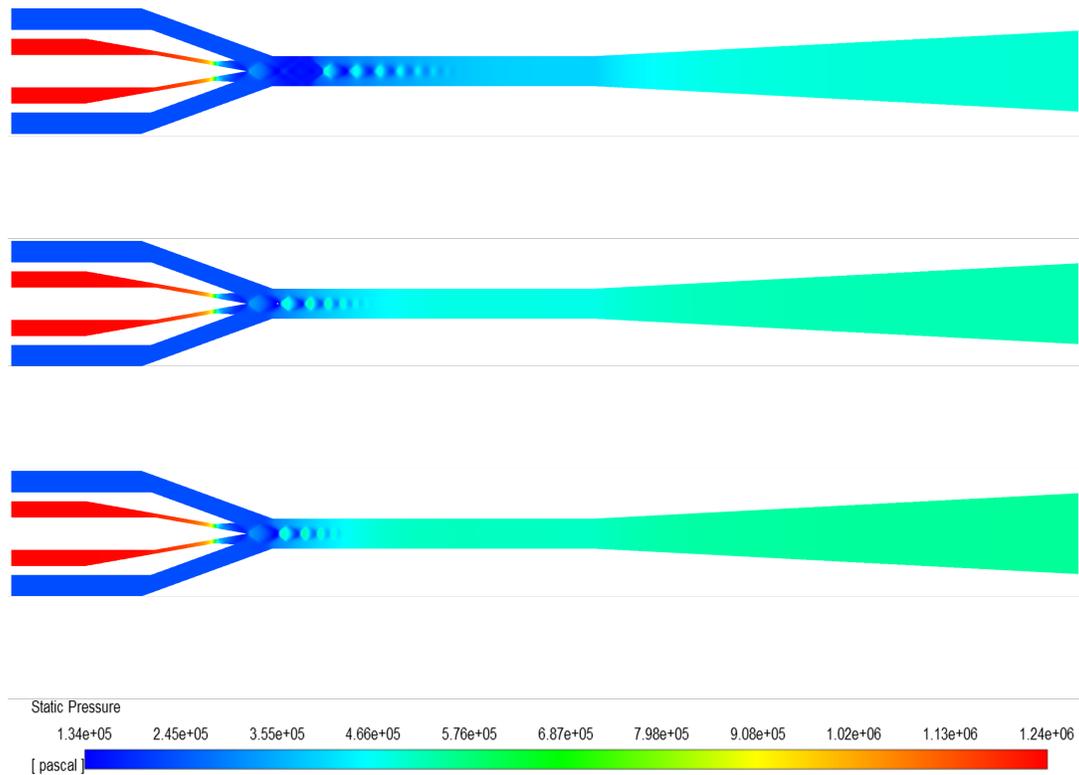


Figura 5.3: Contornos de presión del eyector de geometría variable. Imagen superior: $P_{out} = 5.038 \text{ bar}$; Imagen central: $P_{out} = 5.338 \text{ bar}$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.538 \text{ bar}$.

En todos los contornos de presión representados en la Figura 5.3 se observan los conocidos diamantes de choque. Este patrón aparece como consecuencia de la formación de ondas de choque estacionarias de expansión a lo largo del conducto. Estas ondas de choque son zonas con alto gradiente en las propiedades del flujo y ayudan a comprimir o expandir el flujo, dependiendo del régimen que se encuentre el flujo. Se puede apreciar como una vez desaparecen las ondas de choque en el conducto de mezcla la presión permanece homogénea hasta que se produce la compresión final del flujo en el último tramo divergente. Los dos últimos contornos muestran el modo subcrítico y mal funcionamiento del eyector y respecto del modo óptimo (contorno superior), el tren de ondas de choque a lo largo del conducto de mezcla permanece una menor distancia, con lo que la presión en el conducto de mezcla es más homogénea por la ausencia de estas ondas. Conforme el gradiente de presiones entre la entrada y la salida se vuelve más adverso, la circulación del flujo en el sentido positivo se dificulta, hasta llegar al punto ($P_{out} = 5.538 \text{ bar}$) donde el flujo es incapaz de seguir circulando en la dirección axial

con sentido positivo y termina por circular en sentido reverso en el conducto secundario. El fenómeno de reversa del flujo en el conducto secundario se observa en mayor detalle en la Figura 5.4 donde se representan los vectores de velocidad en el eyector para $P_{out} = 5.538 \text{ bar}$:

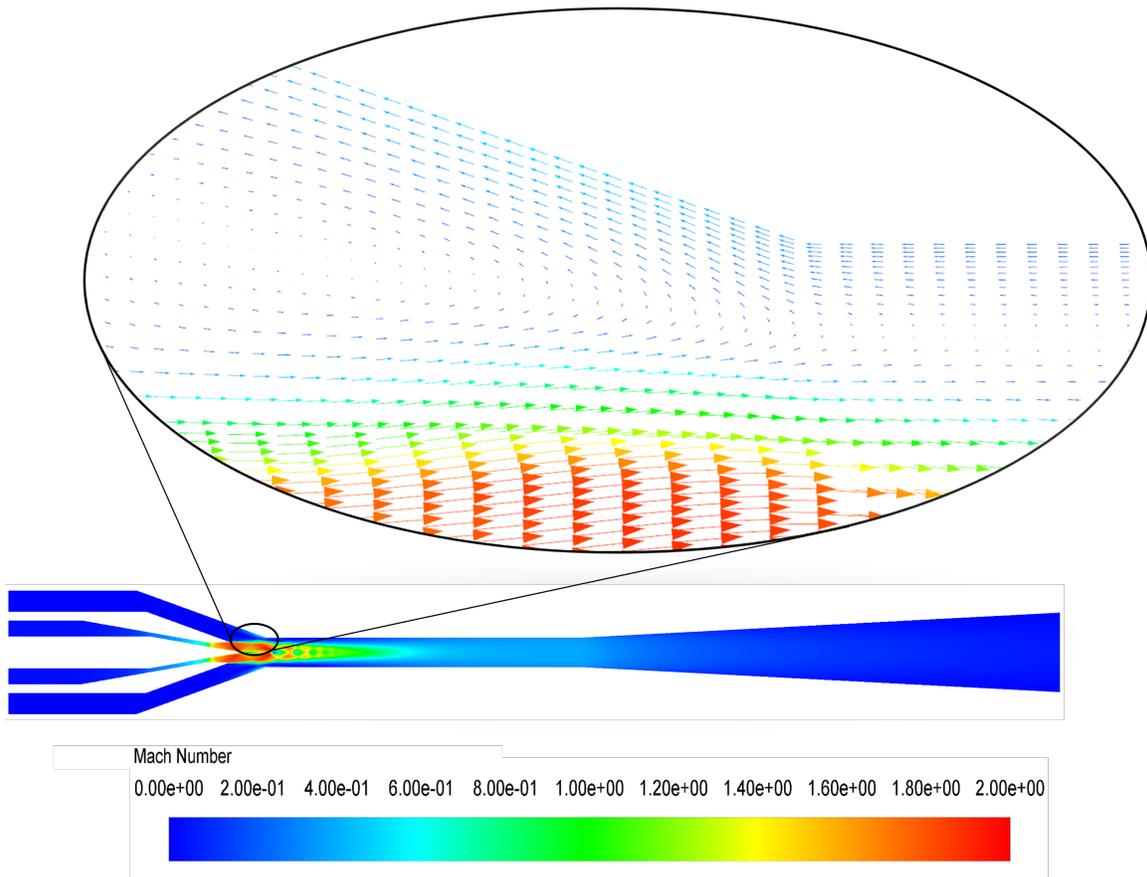


Figura 5.4: Vectores de velocidad para una $P_{out} = 5.538 \text{ bar}$ del eyector de geometría variable.

En cuanto a los contornos de Mach en el eyector se representan en la Figuras 5.5 para los mismos puntos estudiados en los contornos de presión:

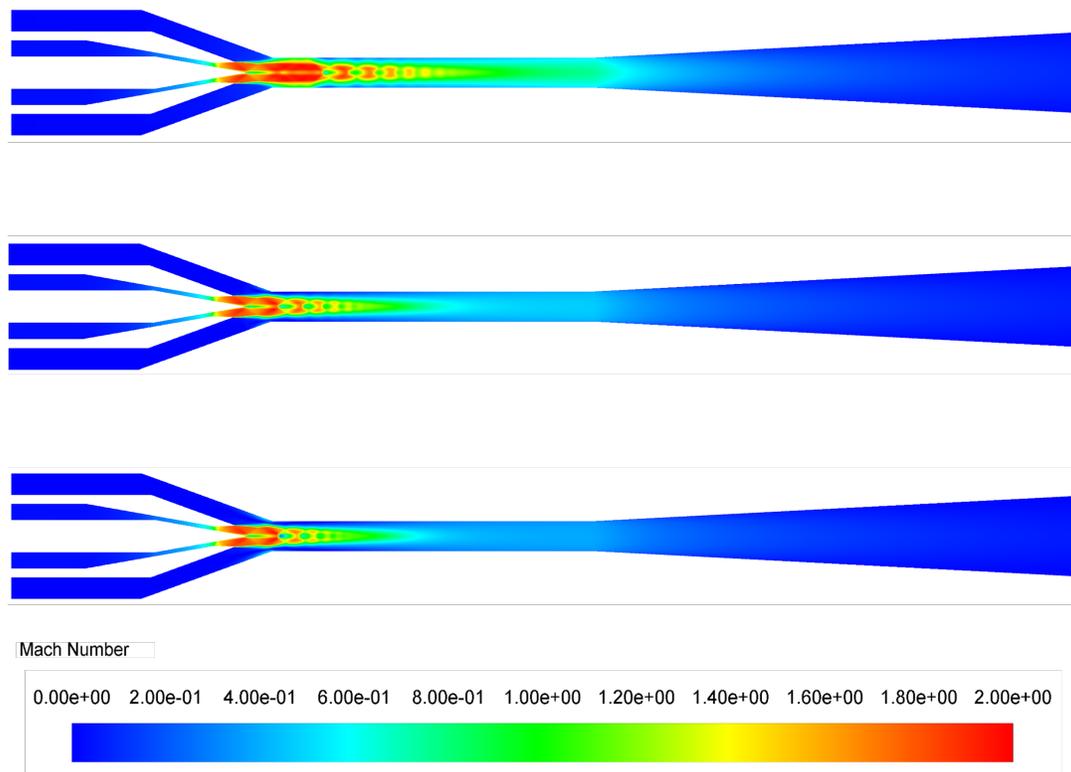


Figura 5.5: Contornos de Mach del eyector de geometría variable. Imagen superior: $P_{out} = 5.038 \text{ bar}$; Imagen central: $P_{out} = 5.338 \text{ bar}$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.538 \text{ bar}$.

En este contorno se visualizan nuevamente los trenes de ondas de choque y el patrón de diamante para las diferentes presiones impuestas a la salida del eyector. Se puede visualizar que para una presión inferior en la salida, la velocidad del flujo permanece una mayor distancia a un mayor Mach, con lo que las ondas de choque se mantendrán una mayor distancia a lo largo del conducto de mezcla. En el caso representado en la imagen central el eyector sigue funcionando correctamente, aunque sus prestaciones caen de forma acusada, apreciándose que la región donde se alcanzan mayores velocidades es más reducida. Finalmente, ya en mal funcionamiento, se sigue observando el tren de ondas de choque, aunque con un menor recorrido, debido a que el flujo primario sigue en condiciones de choque pero no el flujo que circula por el secundario que pasa a circular en sentido reverso.

Finalmente, los contornos de temperatura en el eyector se representan en la Figuras 5.6 para los mismos puntos estudiados en los contornos anteriores:

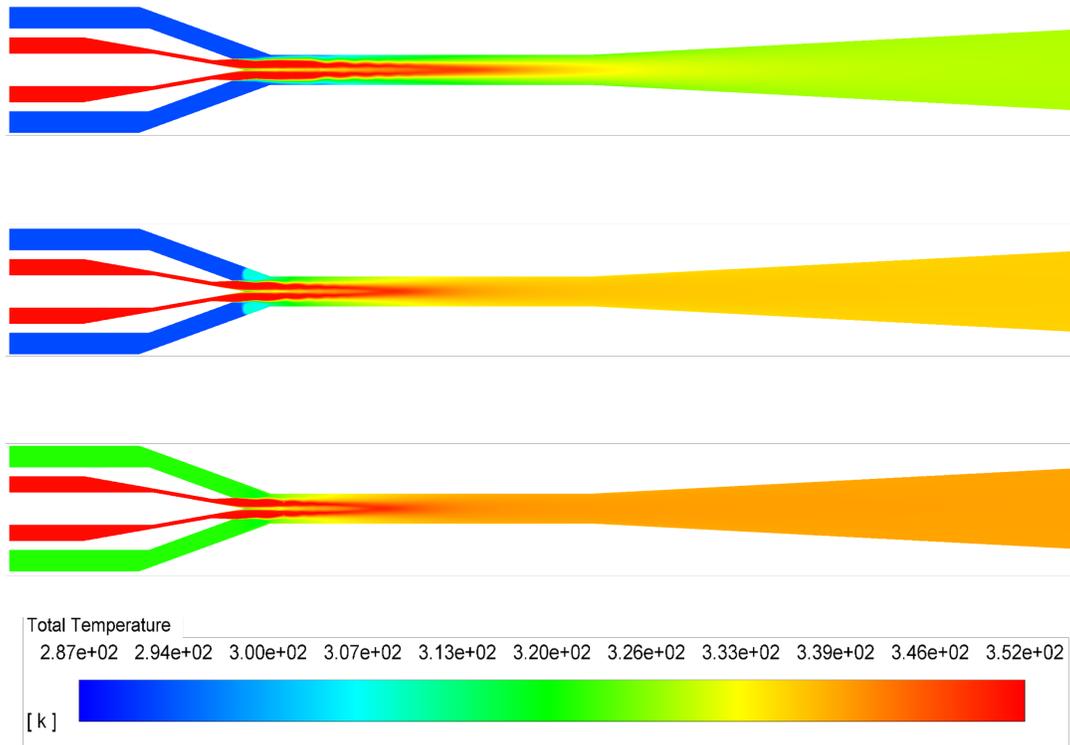


Figura 5.6: Contornos de temperatura del eyector de geometría variable. Imagen superior: $P_{out} = 5.038 \text{ bar}$; Imagen central: $P_{out} = 5.338 \text{ bar}$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.538 \text{ bar}$.

En los contornos de temperatura se observa claramente cual de ellos representa al eyector funcionando en condiciones óptimas. La Figura 5.6 muestra como las dos corrientes entran por el conducto primario, donde el flujo procede del generador y se ha calentado, y por el secundario, donde el flujo procede del evaporador y presenta una temperatura mucho menor. Se aprecia como ambas corrientes entran en el conducto de mezcla y su temperatura se uniformiza en el flujo conjunto, lo que justifica que la longitud de dicho conducto es suficiente. Para la imagen superior se observa que la región donde el gradiente de temperaturas es más acusado persiste una distancia mayor como consecuencia de la presencia del tren de ondas de choque, mientras que en los dos siguientes esta región es mucho menor y la temperatura de la mezcla se iguala antes. Por contra, se observa que las temperaturas alcanzadas en la salida del eyector para el modo de funcionamiento óptimo son mucho menores que cuando el eyector pierde prestaciones, debido a que se abandona su punto de diseño y la misión para que se ha concebido la instalación no es llevada a cabo satisfactoriamente.

Para paliar los efectos negativos inducidos por el cambio en las condiciones de contorno entra en juego la aguja móvil en el interior del eyector, variando la geometría interna del conducto principal estrangulando o abriendo la garganta de la tobera.

En la Figura 5.7 se muestra el efecto producido por 5 posiciones diferentes de la aguja para una temperatura de $78 \text{ }^\circ\text{C}$ a la entrada del conducto principal variando la presión

a la salida del eyector:

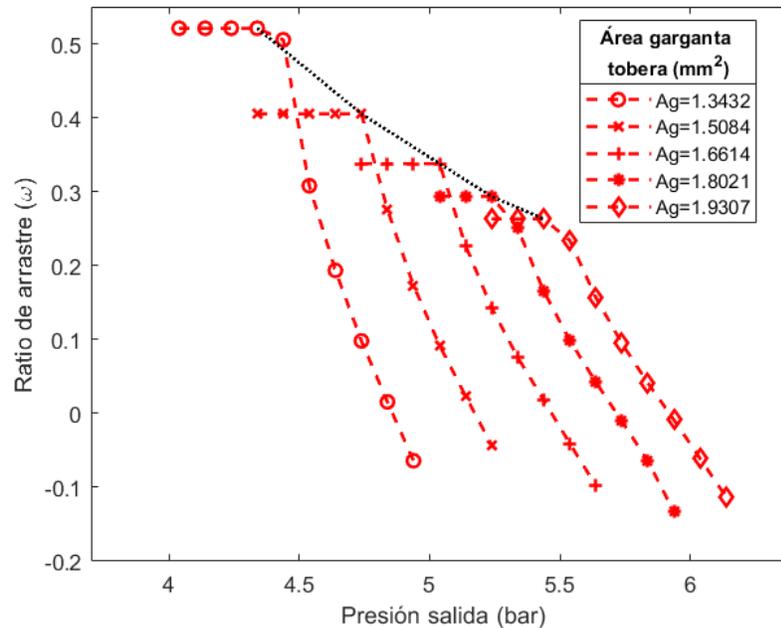


Figura 5.7: Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida y variando la posición de la aguja.

El fenómeno descrito en líneas anteriores se repite: para una posición fija de la aguja, las prestaciones del eyector caen bruscamente cuando se supera una presión en la salida del eyector. Para prolongar las prestaciones óptimas a las que funciona el eyector es beneficioso la contracción de la aguja para un rango de presiones superior, consiguiendo que el área de la garganta de la tobera principal sea mayor. En cambio, para un rango de presiones menor, la aguja penetra en mayor profundidad en el eyector, consiguiendo que el área de la tobera principal se reduzca. Este desplazamiento axial en la aguja repercute directamente sobre las condiciones de expansión, entrada y mezcla de ambas corrientes en el eyector, produciéndose cambios en la estructura estacionaria de ondas de choque que tienen lugar en el conducto de mezcla. Estos cambios se reflejan directamente en las prestaciones del eyector, pues para un área menor de la tobera se consiguen ratios de arrastre superiores a los que se alcanzan cuando la aguja se contrae.

Se comprueba que los puntos de inflexión donde se produce la pérdida de las prestaciones, para cada una de las posiciones de la aguja, se pueden unir mediante una línea que responde a la ecuación de una recta. La aguja móvil en el eyector se moverá por estos puntos, ajustando su posición de forma automática para garantizar el máximo de prestaciones para las condiciones de contorno durante su funcionamiento. La instalación de esta tecnología transforma la sencilla geometría del eyector en un mecanismo complejo a costa de mejorar las prestaciones del eyector ante el entorno cambiante.

Por otro lado, se estudia la dependencia de las prestaciones del eyector con la variación

de la temperatura en la entrada del conducto principal del eyector. La fuente de esta temperatura está en el generador de la instalación de refrigeración y depende de la temperatura alcanzada en el colector solar para la aplicación estudiada.

Se representa en la Figura 5.8 las curvas que resultan de unir los puntos de inflexión donde caen las prestaciones del eyector para 5 temperaturas distintas a la entrada del eyector y las mismas posiciones de aguja representadas en la Figura 5.7:

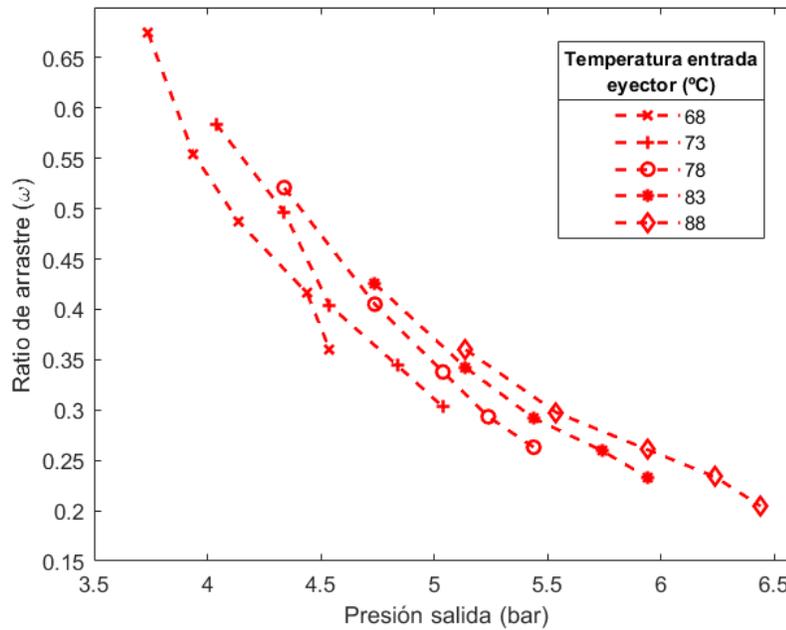


Figura 5.8: Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida para diferentes temperaturas a la entrada del conducto principal del eyector.

De la Figura 5.8 se observa que los puntos se desplazan hacia la derecha y abajo conforme la temperatura aumenta. Esto se traduce en que el funcionamiento del eyector en condiciones de diseño permanece durante un intervalo mayor de presiones a la salida, aunque las prestaciones del eyector son inferiores para una misma posición de la aguja. Esto no quiere decir que las prestaciones sean inferiores, sino lo contrario, pues su rango de funcionamiento óptimo se amplía y solamente moviendo la aguja en la dirección axial hacia el interior del conducto se alcanzarán mayores prestaciones. Se puntualiza que la pendiente de las rectas asociada a los puntos óptimos para cada temperatura es menor conforme se aumenta la temperatura lo que responde al mejor funcionamiento del eyector. Se concluye así que cuanto mayor sea la temperatura alcanzada en el generador el intervalo de presiones a las que la instalación puede funcionar óptimamente es más amplio, aunque el máximo en las prestaciones se verá menguado, de ahí la importancia de la buena instalación del colector solar o de la fuente de calor en aplicaciones industriales.

Finalmente se ha realizado el estudio variando la presión de entrada del conducto secundario del eyector. Este estudio se representa en la Figura 5.9 para una temperatura de 78 °C:

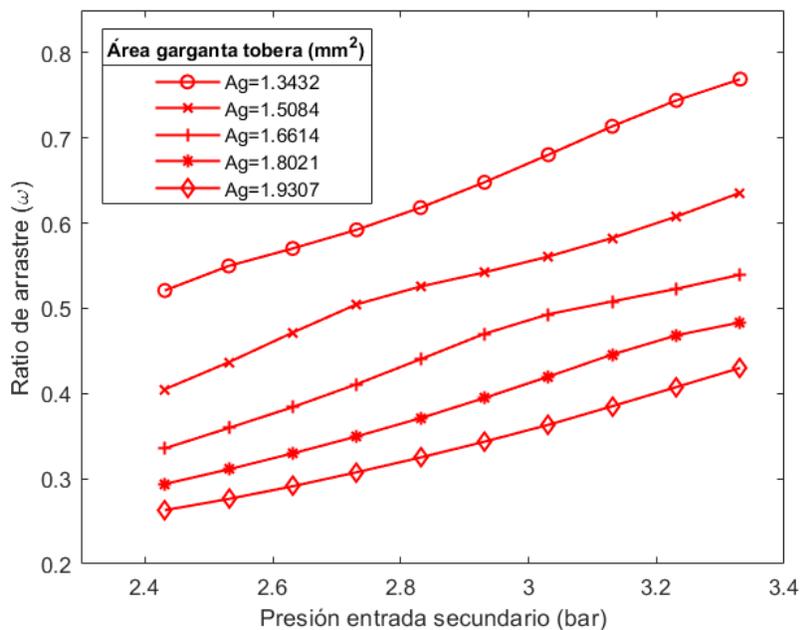


Figura 5.9: Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la entrada del conducto secundario del eyector.

En la Figura 5.9 el aumento de la presión a la entrada del conducto secundario se traduce en un aumento de prestaciones del eyector, pues el ratio de arrastre que se obtiene es mayor como consecuencia que el gasto másico trasegado por el conducto secundario aumenta mientras que el gasto del primario permanece constante. Lo mismo ocurre conforme el área de la garganta disminuye, pero este fenómeno ya se conocía de los resultados obtenidos en la Figura 5.7.

Capítulo 6

Estudio del funcionamiento del eyector aerospike y comparativa entre configuraciones

En este capítulo se presenta un estudio para el eyector aerospike análogo al realizado para el eyector de geometría variable. Nuevamente se va a focalizar en el comportamiento del eyector cuando se abandonan las condiciones de diseño y como afecta a sus prestaciones.

El punto de partida es el descrito en el Capítulo 4. A diferencia del caso del eyector de geometría variable, la geometría generada en el caso base es con la que se ha realizado todo el estudio de condiciones de contorno, pues las cotas geométricas más influyentes en las prestaciones del eyector aerospike son más complejas que para el de geometría variable y para fijar su geometría se afinó en un primer momento a partir de estudios realizados con anterioridad. Además, el hecho de que la geometría del eyector este optimizada para unas condiciones de contorno determinadas no tiene influencia en el estudio de su respuesta ante cambios en el entorno.

Cabe destacar que el análisis para el eyector aerospike es menos complejo que el de geometría variable, pues este no dispone de una aguja móvil para poder cambiar su geometría interna y adaptar el flujo cuando las condiciones cambian, por lo que el número de casos simulados y la carga de cálculo es muy inferior.

6.1. Respuesta fuera de las condiciones de diseño

El estudio sobre la respuesta fuera de las condiciones de diseño en el eyector aerospike es el que va a determinar cual de los modelos de eyector estudiados mantiene mejor sus prestaciones. Tal y como se ha comentado en capítulos anteriores, la configuración de

tobera aerospike nace por la necesidad de adaptar la tobera ante los grandes cambios en la atmósfera con la progresión en la altura en las primeras fases del despegue de motores cohete, por ello se ha elegido esta configuración para el análisis y comprobar su capacidad de adaptación sin necesidad de partes móviles que modifiquen la geometría interna del eyector y que compliquen el sistema.

Las condiciones del entorno que se van a variar van a ser las mismas que para el eyector de geometría variable, es decir, la presión a la salida del eyector, a la entrada del secundario y la temperatura.

En primer lugar se va a estudiar el comportamiento del eyector ante la variación de la presión a la salida del mismo. Cabe destacar que las condiciones fijadas son las de la Tabla 4.2.

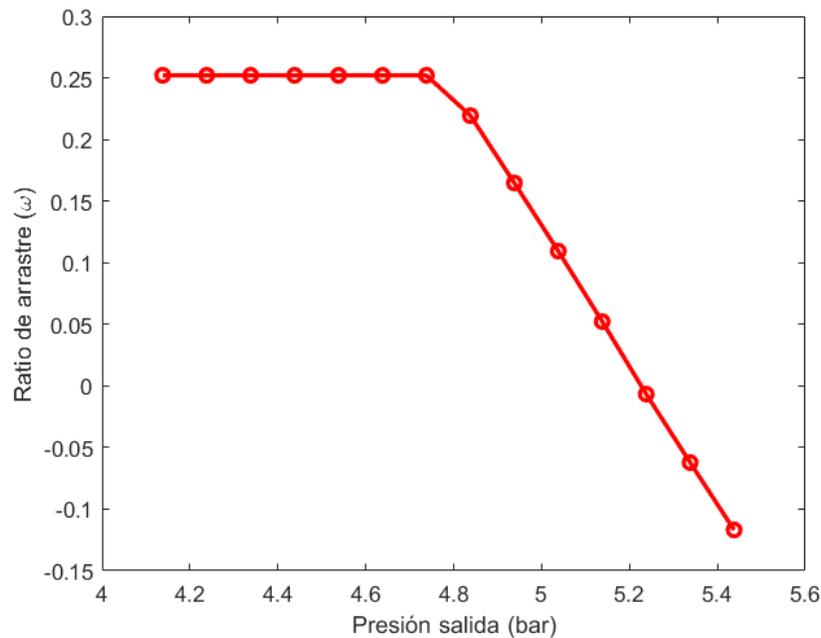


Figura 6.1: Ratio de arrastre del eyector aerospike en función de la variación de la presión a la salida.

En la Figura 6.1 se refleja el mismo fenómeno observado en el eyector de geometría variable: existe un punto de inflexión para el que valores superiores de presión a la salida del eyector provoca una caída brusca en las prestaciones del eyector hasta llegar a producir el mal funcionamiento de la instalación con flujo recirculando en el conducto secundario. Para presiones a la salida inferiores a las de este punto las prestaciones del eyector se mantienen constantes e iguales a las del punto de diseño.

Tal y como se ha explicado anteriormente para el eyector de geometría variable, el mapa obtenido responde a los diferentes modos de funcionamiento de un eyector supersónico: modo crítico (doble choque de ambas corrientes), modo subcrítico (choque

de la corriente principal), flujo en retorno.

A continuación se muestran los contornos de presión, velocidad (Mach) y temperatura del eyector aerospike para cada uno de los modos de funcionamiento.

En primer lugar, en la Figura 6.2 se muestran los contornos de presión estática obtenidos para el aerospike:

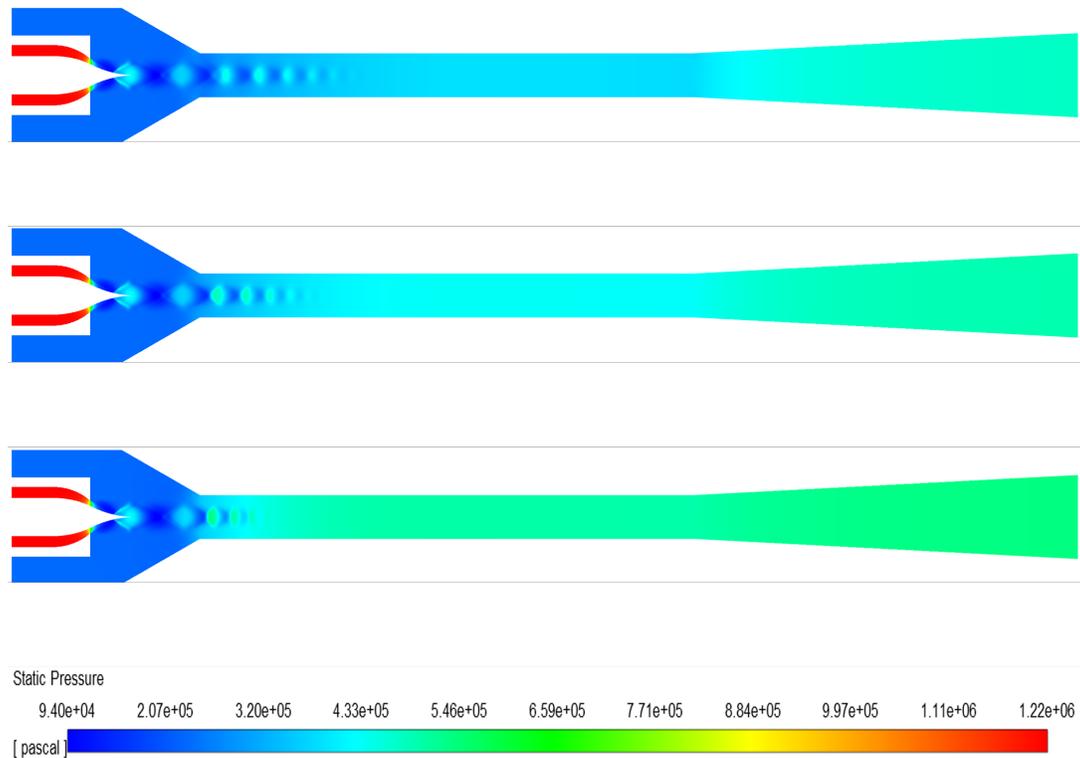


Figura 6.2: Contornos de presión del eyector aerospike. Imagen superior: $P_{out} = 4.838 \text{ bar}$; Imagen central: $P_{out} = 5.038 \text{ bar}$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.438 \text{ bar}$.

De la Figura 6.2 se observa, para los tres casos representados, un fuerte gradiente de presiones en la garganta de la tobera principal por la entrada del flujo en condiciones sónicas y como al final del aerospike se produce una onda de expansión que desemboca en el tren de ondas de choque. Se puede apreciar como en el primer contorno, el tren de ondas de choque se mantiene una mayor distancia una vez ingresa en el conducto de mezcla lo que promueve mejor la mezcla de ambas corrientes, en cambio para los otros dos contornos el tren de ondas de choque es más corto y si continuara aumentando la presión a la salida acabaría por desaparecer. Con el aumento de la presión a la salida del eyector el gradiente de presiones se hace más adverso, hasta llegar al punto donde el flujo en el conducto secundario circula en sentido opuesto al deseado. Es el mismo comportamiento al observado para el eyector de geometría variable.

Los contornos de Mach para el eyector aerospike se representan en la Figura 6.3 para

las mismas condiciones impuestas que en los contornos de presión:

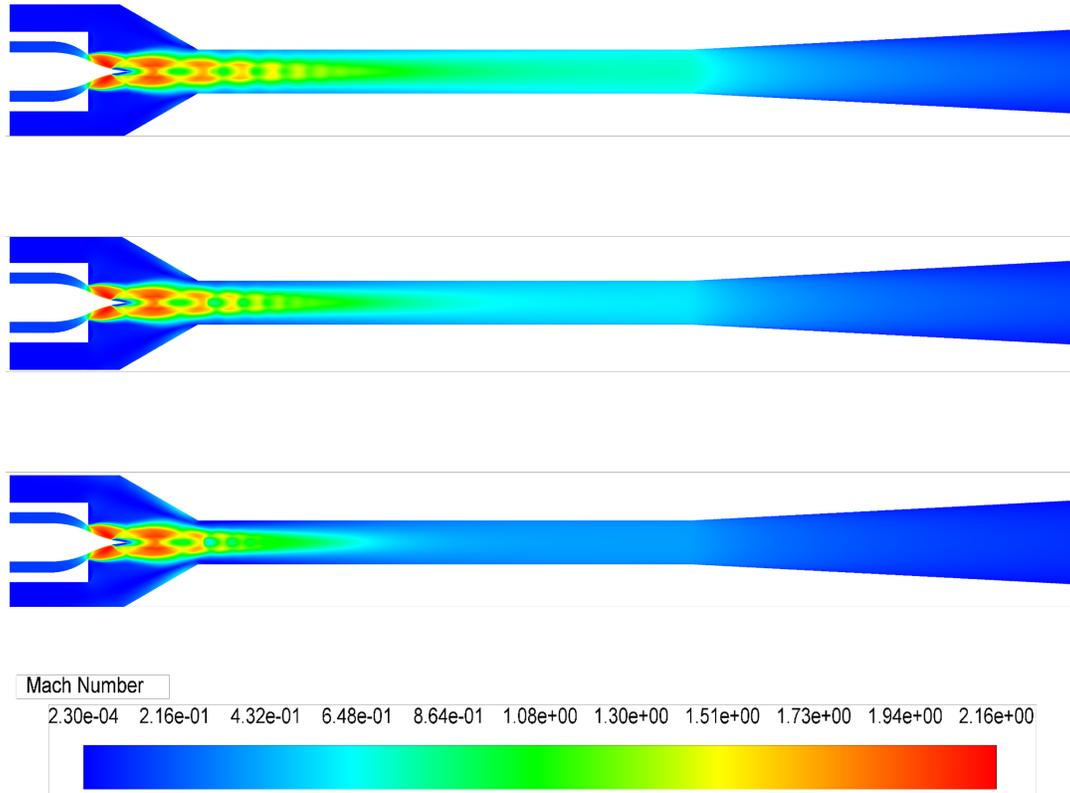


Figura 6.3: Contornos de Mach del eyector aerospike. Imagen superior: $P_{out} = 4.838 \text{ bar}$; Imagen central: $P_{out} = 5.038 \text{ bar}$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.438 \text{ bar}$..

Al igual que ocurre en los contornos de presión se observa claramente los trenes de ondas de choque a lo largo del eyector. Se aprecia como conforme el gradiente de presiones entre salida y entrada es más adverso las ondas de choque se extienden una menor distancia. Los contornos de alta velocidad se mantienen una mayor distancia en el interior del conducto de mezcla para el funcionamiento correcto del eyector ($P_{out}=4.838 \text{ bar}$), mientras que para el mal funcionamiento del eyector las velocidades que se alcanzan antes del último tramo divergente son muy inferiores. Para una presión de $P_{out} = 5.438 \text{ bar}$ se distingue la recirculación del flujo en el conducto secundario con unos colores azul claro en las paredes de la cámara de succión, donde termina dicho conducto. Este fenómeno se representa con mayor detalle en la Figura 6.4.

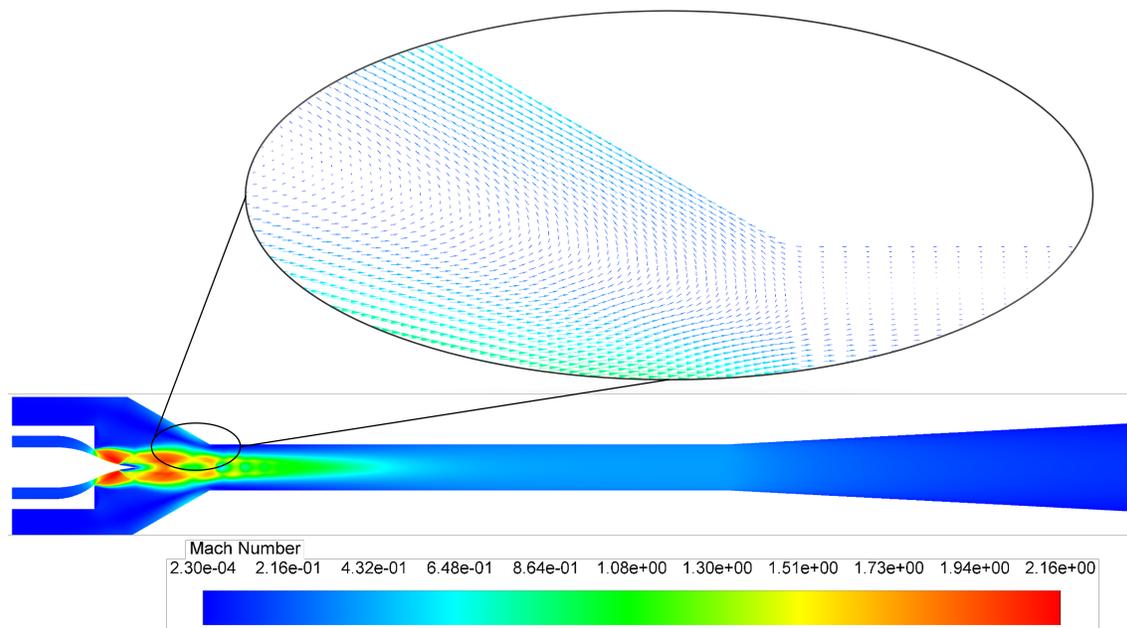


Figura 6.4: Vectores de velocidad para una $P_{out} = 5.438 \text{ bar}$ del eyector aerospike.

Finalmente se representan los contornos de temperatura obtenidos para el eyector aerospike en la Figura 6.5:

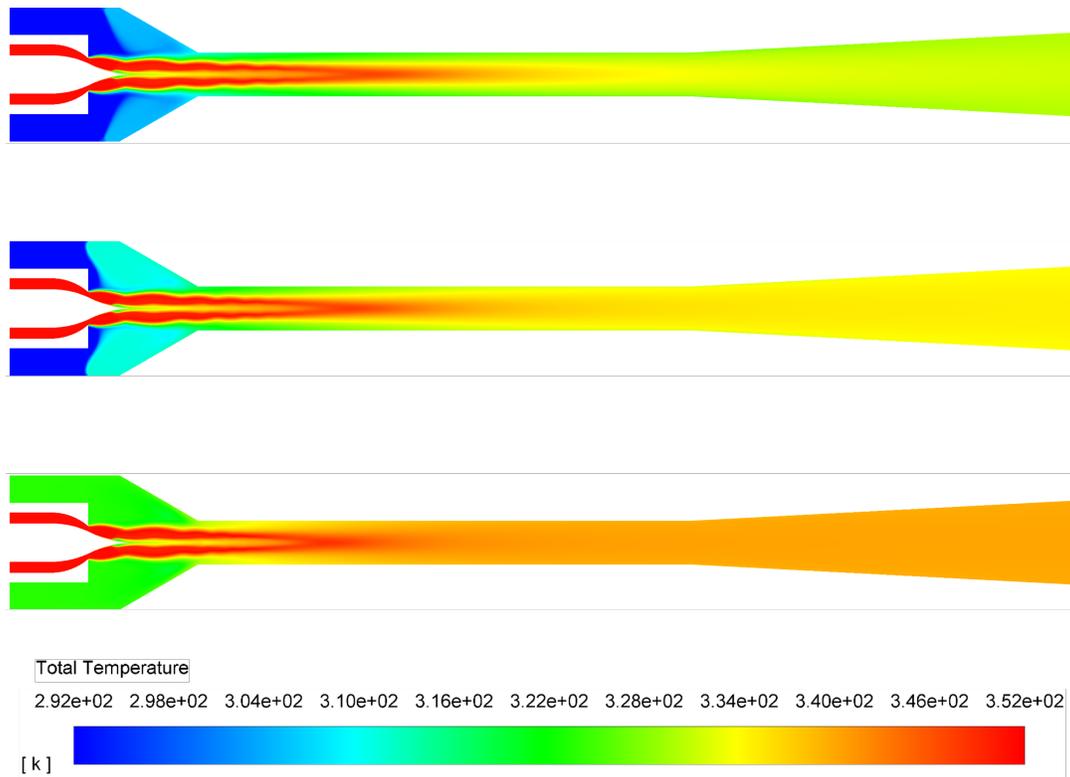


Figura 6.5: Contornos de temperatura del eyector aerospike. Imagen superior: $P_{out} = 4.838 \text{ bar}$; Imagen central: $P_{out} = 5.038 \text{ bar}$; Imagen inferior: $P_{out} = 5.438 \text{ bar}$.

De los contornos obtenidos de temperatura se observa para los tres casos un fenómeno común: en el extremo del aerospike y durante un tramo del eyector existe una región donde la temperatura es inferior a la de la corriente que entra por el conducto principal hasta que llega a ser homogénea aguas abajo en el conducto de mezcla. Esto es debido al efecto inducido por las ondas de choque del flujo primario que entra en la cámara de succión a una velocidad superior a $\text{Mach}=1$ evitando que ambas corrientes primarias se lleguen a mezclar y se forme un gradiente de temperaturas entre la temperatura de la corriente que ingresa en el eyector y la temperatura del eyector antes de la influencia de dicha corriente. Por otro lado, queda patente el buen funcionamiento del eyector para una $P_{out} = 4.838 \text{ bar}$, donde la corriente caliente que proviene del generador y la corriente fría del evaporador entran en el eyector con diferentes temperaturas en la cámara de succión. Ambas corrientes circulan a lo largo del conducto de mezcla igualando sus temperaturas y abandonan el eyector. Para una presión de $P_{out} = 5.038 \text{ bar}$ el gradiente de temperaturas en la cámara de succión es menos acusado y a la salida del eyector se consigue una temperatura superior que en el caso anterior. Finalmente, para una $P_{out} = 5.438 \text{ bar}$, la recirculación de la corriente secundaria es patente apreciándose como la temperatura en las inmediaciones del conducto secundario es muy superior a la de los otros dos, pues la corriente que entra por el conducto primario a una temperatura muy superior a la del evaporador recircula en sentido reverso e impide la entrada del flujo por el conducto, provocando que a la salida del eyector se alcancen temperaturas

muy elevadas.

En el caso del eyector aerospike no se dispone de ningún elemento móvil o mecanismo que permita variar su geometría interna adaptándose a las condiciones cambiantes del entorno por lo que la evolución en las prestaciones del eyector ante estos cambios es la mostrada en la Figura 6.1.

Por otro lado, queda comprobar el efecto producido por el cambio de temperatura a la entrada del conducto primario en las prestaciones del eyector, pues esta será una condición muy oscilante según el clima y meteorología en la instalación del colector solar.

Se muestra en la Figura 6.6 el mapa obtenido para las prestaciones del eyector aerospike para diferentes temperaturas estudiadas en los puntos de inflexión de la Figura 6.1:

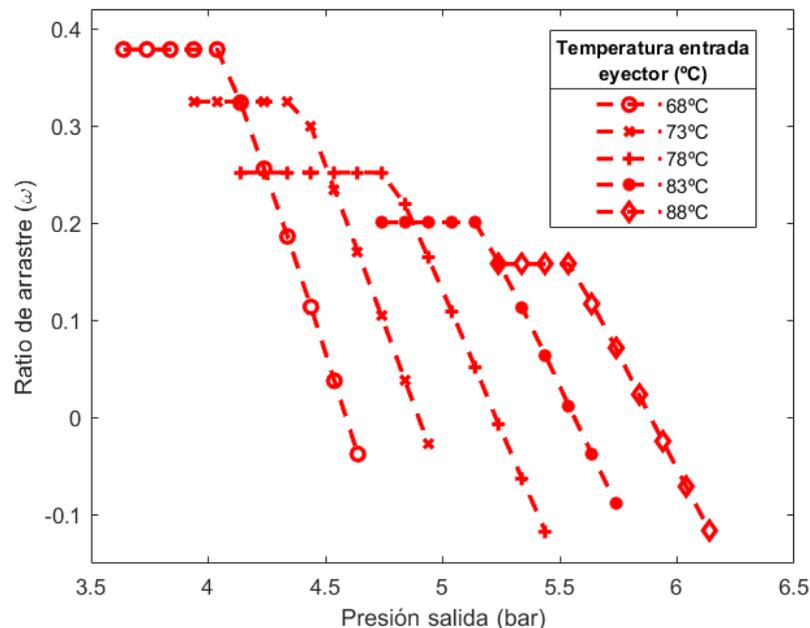


Figura 6.6: Ratio de arrastre del eyector aerospike en función de la variación de la presión a la salida para diferentes temperaturas a la entrada del conducto principal del eyector.

La tendencia representada en la Figura 6.6 es análoga a la observada en el caso del eyector de geometría variable: conforme la temperatura a la entrada del eyector aumenta la curva de las prestaciones se desplaza hacia la derecha y hacia abajo. Esto se traduce en que las máximas prestaciones del eyector, representadas por el ratio de arrastre, van a obtenerse para temperaturas inferiores, en cambio, el intervalo en que el eyector sigue funcionando con las mismas prestaciones a las de su punto de diseño es más amplio conforme la temperatura a la entrada del conducto principal aumenta. Siempre que sea posible hay que llegar a una solución que establezca un compromiso entre las

prestaciones del eyector y la permisividad del mismo ante las condiciones cambiantes del entorno.

Finalmente, en la Figura 6.7 se presenta el estudio realizado variando la presión a la entrada del conducto secundario con las mismas condiciones de diseño que las presentadas en la definición del caso base (Sección 4.3.2):

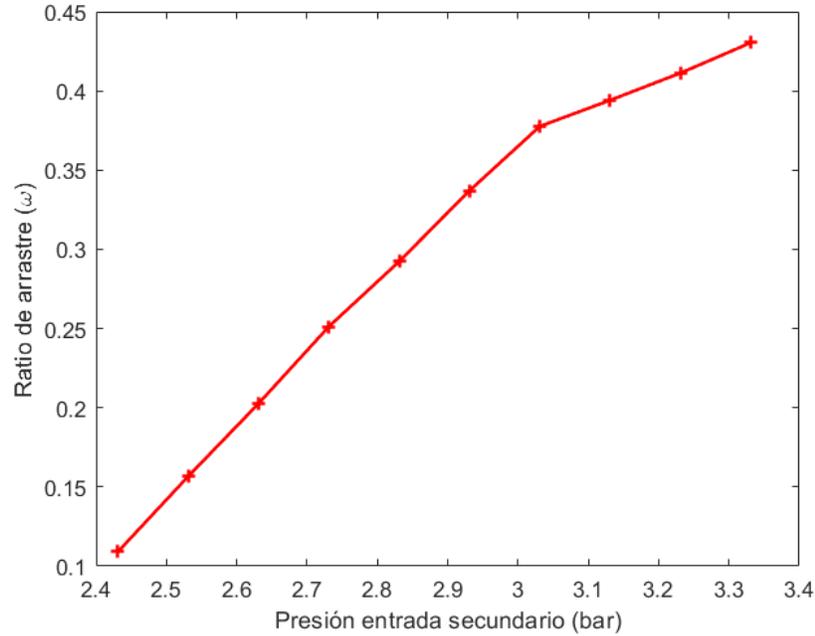


Figura 6.7: Ratio de arrastre del eyector aerospike en función de la variación de la presión a la entrada del conducto secundario.

Nuevamente se repite la tendencia observada para el eyector de geometría variable: conforme la presión a la entrada del conducto secundario del eyector aumenta las prestaciones del eyector aumentan. Esto es lógico, pues el ratio de arrastre se define como la relación entre el gasto másico del conducto secundario entre el gasto del primario y al aumentar la presión el gasto másico que trasiega el conducto secundario aumenta mientras que el del primario permanece constante.

Capítulo 7

Conclusiones y proyección futura

A lo largo de todo el proyecto se ha realizado un profundo estudio sobre el funcionamiento de eyectores y su aplicación en ciclos de refrigeración en instalaciones con colector solar. Todo el estudio se ha realizado mediante simulaciones del comportamiento del flujo en CFD, detallándose todo el proceso seguido para llegar a obtener los resultados presentados: desde la generación de las geometrías para las diferentes configuraciones de eyector, pasando por la generación de la malla, definición de condiciones de contorno y modelos de turbulencia hasta llegar a la presentación de mapas de contorno y prestaciones.

Todo el proceso de cálculo realizado se ha llevado a cabo gracias a la utilización del cluster de cálculo Rigel de la Universidad Politécnica de Valencia, que ha permitido abordar la gran cantidad de casos lanzados con varias simulaciones resolviéndose en paralelo en módulos de gran potencia de cálculo. La optimización y metodología seguida para optimizar mediante la generación de macros todo el proceso en el cambio de condiciones de contorno y simulación de los casos ha sido clave para ahorrar tiempos de ingeniero y automatizar los procesos.

Los objetivos establecidos al inicio del estudio han sido cumplidos satisfactoriamente. Por un lado se ha podido analizar el funcionamiento de un eyector bajo unas condiciones propias de una instalación de refrigeración con colector solar, llegando a conseguir resultados prometedores en las prestaciones del eyector. Se ha trabajado con varias geometrías de eyector para poder establecer una comparativa entre sus prestaciones y comportamiento cuando se abandonan las condiciones de diseño, llegando a caracterizar en detalle cada una de ellas. Tal y como se anticipaba en la teoría, cuando se abandonan las condiciones que optimizan el punto de funcionamiento del eyector se produce una caída brusca en sus prestaciones y se pierde su capacidad para refrigerar.

Respecto a la configuración de eyector de geometría variable se concluye que la pérdida en las prestaciones se puede paliar mediante la acción de la aguja móvil que modifica su geometría interna para adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno. La posición de la aguja puede fijarse de forma automática optimizando el funcionamiento del

eyector, pero esto requiere de un módulo extra que controle el desplazamiento, lo que complica en mayor o menor medida, la instalación del eyector. Además, la presencia de mecanismos móviles dificulta las tareas de mantenimiento de la instalación y ocasiona una pérdida en la robustez del eyector.

Por otro lado, la configuración aerospike ha demostrado un comportamiento análogo al de un eyector convencional de geometría fija: presenta un punto de inflexión en el que las prestaciones del eyector se desploman cuando se abandonan las condiciones que definen el punto de diseño. A diferencia del eyector de geometría variable, no dispone de ningún mecanismo que le permita adaptarse a las condiciones cambiantes con lo que esta pérdida en las prestaciones es inevitable. Por contra, al carecer de piezas móviles, su funcionamiento es más robusto y seguro, además de facilitar las tareas de mantenimiento que se convierten en prácticamente nulas. A pesar de ello, al no incorporar ninguna mejora respecto a un eyector convencional de geometría fija, su construcción es más costosa por lo que su utilización quedaría desechada en la aplicación de eyectores.

A pesar del estudio realizado mediante simulaciones CFD sería necesario respaldar los resultados obtenidos mediante banco de ensayos y verificar la pérdida en las prestaciones del eyector fuera del punto de diseño.

A nivel formativo, el proyecto ha permitido la adquisición de conocimientos y destrezas en la mecánica de fluidos computacional, especialmente en todo lo que respecta a la generación de dominios de control, mallado estructurado, condiciones de contorno, resolución de la turbulencia y programación de macros para la automatización de los procesos. Además, se ha profundizado en el conocimiento de la tecnología de eyectores y su aplicación en ciclos de refrigeración como una alternativa para reducir la emisión de contaminantes y aprovechamiento de la energía residual y de fuentes renovables.

A pesar de haber realizado un estudio exhaustivo sobre las configuraciones de eyector de geometría variable y aerospike, se han dejado muchos frentes abiertos sin ser tratados y que podrían revelar mejoras en la refrigeración por eyección. La línea del departamento de Renovación de la Carga del CMT-Motores Térmicos pasa por seguir apostando por esta tecnología y empezar a realizar ensayos sobre banco en eyectores. Algunas de las labores que quedan por profundizar son las que se muestran a continuación:

- Valorar el uso de otros fluidos de trabajo (refrigerantes) con tal de maximizar las prestaciones del eyector y seguir con la línea de refrigerantes de bajo impacto ambiental.
- Consideración de nuevas geometrías de eyector que presenten un mejor comportamiento, optimicen las prestaciones y presenten una mejor adaptabilidad ante los cambios en el entorno para superar el punto de inflexión en la pérdida de prestaciones.
- Contemplar el uso de otros modelos para resolver la turbulencia en las simulaciones CFD con tal de obtener mejores resultados.

- Fijar más parámetros que marquen las prestaciones del eyector además del ratio de arrastre y considerar otros efectos negativos como los inducidos por la expansión del flujo.
- Mejorar las simulaciones llevadas a cabo. Esto pasa por considerar los efectos tridimensionales de la turbulencia (simulaciones 3D), suavizar los cambios de secciones en los conductos, mejorar el mallado de la capa límite...
- Contrastar los resultados obtenidos mediante maquetas en bancos de ensayo.
- Extender el estudio a todos los componentes de la instalación de refrigeración para analizar su funcionamiento y como afecta el cambio en las condiciones de contorno a cada uno de los elementos.
- Ampliar el estudio realizado y no conformarse con obtener la evolución de las prestaciones del eyector con la variación de la presión a la salida del mismo, de la temperatura a la entrada del conducto principal o de la presión a la entrada del secundario.
- Estudiar otras aplicaciones del eyector, con otro rango de temperaturas más elevado para observar el comportamiento del eyector bajo estas condiciones.

Con todo ello la tecnología de eyectores presenta un futuro brillante y prometedor, pues se trata de una tecnología con amplio margen de mejora y muchas posibles aplicaciones en el mercado por explotar, además de ser una alternativa sostenible y comprometida con el medio ambiente.

Capítulo 8

Presupuesto

Este capítulo contiene todo lo referente al presupuesto necesario y empleado para el estudio de diferentes geometrías de eyector y sus prestaciones fuera de diseño.

Para el cálculo del presupuesto se va a tener en cuenta tanto los recursos destinados para la compra de las licencias de programas utilizados en los cálculos de las simulaciones, los costes de equipos utilizados para el preproceso y solución de los casos lanzados y finalmente las horas de ingeniero dedicada para cada una de las partes.

Con todo ello se espera poder realizar un balance de las actividades desarrolladas, los resultados obtenidos, las conclusiones extraídas y la inversión realizada para la obtención de las mismas, con tal de definir la dirección de estudio futuros y la metodología a emplear.

En primera instancia se tratan los costes relacionados de las licencias empleadas de todos los programas utilizados para la elaboración del estudio. El paquete Office 2016 ha sido usado para la redacción, tratamiento de imágenes y presentación de resultados. Cabe mencionar que la Universidad Politécnica de Valencia dispone de un acuerdo con Microsoft con lo que las licencias para estudiantes de la entidad disponen de los servicios ofrecidos por el paquete Office de forma gratuita. Lo mismo ocurre para el caso de la licencia de Ansys, Matlab y Autodesk Fusion 360. Ansys se ha utilizado para los cálculos CFD de las simulaciones del flujo en el interior del eyector y al no superar las 512000 celdas, es posible obtener una versión académica para realizar los cálculos con coste nulo. Por otro lado, Matlab se ha utilizado para el post tratamiento de los resultados y representación de las gráficas. Autodesk Fusion 360 se ha utilizado para la representación de los planos y diseño CAD de la geometría del eyector. Por otro lado, la generación de imágenes y de figuras explicativas se ha realizado mediante la herramienta de Inkscape que es de libre acceso y su coste es nulo. Finalmente para la definición de las condiciones de contorno se ha utilizado la librería de libre acceso CoolProp con lo que su coste es nuevamente nulo. Así, el coste total de las licencias de los programas empleados para la realización del proyecto es de **0 €**.

Por otro lado, en la Tabla 8.1 se muestran los costes del soporte físico empleado para la realización del estudio, es decir, del equipo empleado durante todo el proyecto.

Componentes	Precio (€)
TP-LINK TL-WN881ND 300 Mbs	14.95
BenQ BL2420PT 24" LED IPS QHD	249.00
Gigabyte GeForce GTX 1080 WindForce 8 GB	565.00
Corsair RM750x 750w 80 Plus Gold Modular	110.85
NZXT S340	69.95
WD Blue 1TB SATA3	56.20
Samsung 850 EVO SSD series 250GB	94.00
Cooler Master Hyper 212X	30.95
G. Skill Ripjaws V Red DDR4 24000 16 GB	206.00
Asus Prime Z270-P	114.00
Intel Core i7-7700 K 4.2 GHz	296.00
Teclado OONE StrikePro Spectra	89.90
Raton Logitech g502	49.59
Total	1946.39

Tabla 8.1: Presupuesto del equipo empleado para la realización del proyecto.

En la Tabla 8.2 se recoge el coste de las horas de uso del equipo para la realización del trabajo.

	Tiempo (h)	Precio/tiempo (€/h)	Total (€)
Equipo de trabajo	400	0.1	40

Tabla 8.2: Presupuesto de las horas de uso del equipo

La Tabla 8.3 recoge el coste del cluster de cálculo. En cuanto a las tarifas para poder realizar cálculos en el cluster son públicas y corresponde a 0.16 €/h para los nodos de la marca Fujitsu equipados con dos procesadores Intel Xeon E5-2450 8c/16T y 64 GB/RAM DDR3 que se tomarán como representativos. Para tratar este último coste, se tendrán en cuenta los nodos usados y las horas de cálculo empleadas para la simulación de todos los casos.

	Tiempo (h)	Precio/tiempo (€/h)	Total (€)
Cálculo cluster	2300	0.16	368

Tabla 8.3: Presupuesto del cluster de cálculo.

La Tabla 8.4 recoge la inversión realizada para cubrir las horas de mano de obra realizadas por el ingeniero. En este apartado se diferencia entre las labores de cada una de las fases que ha comprendido el proceso total del proyecto:

- **Búsqueda de información y aprendizaje:** corresponde a las horas dedicadas al estudio del funcionamiento de la tecnología de eyectores aplicada a sistemas de aire acondicionado, recopilación de información y trabajos anteriores. También comprende las horas dedicadas al aprendizaje de las herramientas CFD empleadas para la realización del proyecto y los tutoriales realizados.
- **Preproceso CFD:** hace referencia a las horas dedicadas para la generación de la geometría, malla, definición de las condiciones de contorno y en definitiva al planteamiento de los casos lanzados. Esta es la actividad que más horas ha ocupado de todo el proceso, ya que también comprende la automatización del proceso, la generación de los journals y el tiempo en la interfaz de Rigel para poder lanzar los cálculos en el cluster. A su vez, consta de muchas acciones repetidas, pruebas y cálculos que no han llegado a la convergencia.
- **Postproceso CFD:** corresponde al tiempo de ingeniero invertido en el tratamiento de los resultados obtenidos, es decir, obtención de los contornos de interés, gráficas, perfiles... En general se trata de las acciones para presentar los resultados de las simulaciones en tablas o figuras de interés.
- **Redacción de la memoria:** Se trata del tiempo empleado en la redacción del documento presente.

	Tiempo (h)	Precio/tiempo (€/h)	Total (€)
Búsqueda de información y aprendizaje	80	20	1600
Preproceso CFD	300		6000
Postproceso CFD	150		3000
Redacción de la memoria	240		4800
Total	830		16600

Tabla 8.4: Presupuesto destinado a las horas de ingeniero dedicadas para cada actividad.

Por otro lado, se considera en la Tabla 8.5 el sueldo del doctorando responsable del ingeniero que se encarga y asegura que el proceso seguido y los resultados obtenidos son correctos:

	Tiempo (h)	Precio/tiempo (€/h)	Total (€)
Doctorando encargado	25	40	1000

Tabla 8.5: Presupuesto de las horas dedicadas por el doctor encargado.

Finalmente el coste total del proyecto neto, teniendo en cuenta la inversión en cada una de las actividades consideradas, se muestra en la Tabla 8.6:

Actividad	Precio (€)
Licencias	0
Equipo	1946.39
Uso de equipo	40.00
Cluster de cálculo	368.00
Trabajo del ingeniero	16600.00
Trabajo del doctorando	1000.00
Total bruto	19954.39

Tabla 8.6: Total bruto del presupuesto invertido.

A esta inversión neta se le tiene que sumar, por una parte, el 10% de este total en concepto de beneficio industrial y por otra parte, a la suma del total neto más el beneficio industrial se le tiene que añadir un 21% de IVA. El total bruto se muestra en la Tabla 8.7:

Actividad	Precio (€)
Beneficio industrial (10%)	1995.44
IVA (21%)	4609.46
Total neto	26559.29

Tabla 8.7: Total neto del presupuesto invertido.

Bibliografía

- [1] El Mundo. Instalaciones cmt-motores térmicos, 2014.
- [2] CMT-Motores Térmicos. Organization chart cmt-motores térmicos, 2021.
- [3] Gerald Hagemann, Hans Immich, Thong Van Nguyen, and Gennady E. Dumnov. Advanced rocket nozzles. *Journal of Propulsion and Power*, 1998.
- [4] Danfoss. Aplicación práctica del refrigerante r600a isobutano en sistemas refrigerados domésticos. *DOCPLAYER*, 2021.
- [5] Matthew D. Piggott, P. A. Allison, P.E. Farrell, and H.R. Hiester. Assessment of spurious mixing in adaptive mesh simulations of the two-dimensional lock-exchange. *Elsevier*, 2014.
- [6] Luis Miguel García Cuevas, Antonio Gil Megías, Roberto Navarro García, and Pedro Manuel Quintero Igeño. Mecánica de fluidos computacional: tipos de mallas y calidad del mallado. *Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos*, 2021.
- [7] Jose María Desantes. Cmt-motores térmicos, 2021.
- [8] Giorgio Besagni, Riccardo Mereu, and Fabio Inzoli. Ejector refrigeration: A comprehensive review. *Elsevier*, 2015.
- [9] Jianyong Chen, Sad Jarall, Hans Havtun, and Björn Palm. A review on versatile ejector applications in refrigeration systems. *Elsevier*, 2015.
- [10] HNTTools. Qué es y cómo funciona un eyector, 2021.
- [11] Alejandro Rodríguez. MÚltiple de admisiÓN, 2021.
- [12] NASA. Normal shock wave, 2021.
- [13] NASA. Oblique shock wave, 2021.
- [14] NASA. Prandtl-meyer angle, 2021.
- [15] José Galindo, Vicente Dolz, Andrés Tiseira, and Alberto Ponce-Mora. Numerical assessment of the dynamic behavior of a solar-driven jet-ejector refrigeration system equipped with an adjustable jet-ejector. *Elsevier*, 2020.

-
- [16] Didascalía. Tipos, propiedades y particularidades de los refrigerantes, 2021.
 - [17] Asircra SL Comercial. Clasificación y tipos de gases refrigerantes, 2021.
 - [18] Bacharrach. Comprensión de la clasificación de seguridad de refrigerantes, 2021.
 - [19] Química Marcat. Ficha de datos de seguridad isobutano (gas refrigerante r 600a). *Química Marcat*, 2013.
 - [20] Roberto Navarro García. Tema 6. introducción al cfd, 2018.
 - [21] Roberto Navarro García. Tema 7. preproceso en cfd, 2018.
 - [22] Pedro Martí Gómez-Aldaraví. Ud4. turbulencia, 2018.
 - [23] C.D. Argyropoulos and N.C. Markantos. Applied mathematical modelling. *Elsevier*, 2014.
 - [24] Roberto Navarro García. Tema 8. aspectos numéricos y resolución en cfd, 2018.
 - [25] Alberto Ponce Mora. Optimización de la geometría de un eyector para ciclos de refrigeración. *RiuNet*, 2017.
 - [26] Alberto Ponce Mora. Feasibility of using jet-ejector refrigeration cycles to recover thermal energy from different sources. *RiuNet*, 2021.
 - [27] Universitat Politècnica de València. Clúster de cálculo: Rigel, 2021.

Parte II

Anexos

Capítulo 9

Resultados

9.1. Tablas de resultados

Diámetro conducto de mezcla (mm)						
2.6	0.2569	0.2524	0.2457	0.2327	0.2178	0.2079
2.7	0.2984	0.2970	0.2913	0.2760	0.2608	0.1608
2.8	0.3329	0.3396	0.2804	0.2191	0.1392	0.0644
2.9	0.1953	0.1858	0.1440	0.1023	0.0177	-0.0319
3	0.0770	0.0683	0.0346	-0.0146	-0.1038	-0.1282
3.1	-0.0413	-0.0492	-0.0724	-0.1314	-0.2253	-0.2246
3.2	-0.1595	-0.1667	-0.1860	-0.2482	-0.3468	-0.3209
3.3	-0.2778	-0.2842	-0.3041	-0.3650	-0.4683	-0.4173
3.4	-0.3961	-0.4017	-0.4266	-0.4818	-0.5898	-0.5136
3.5	-0.5144	-0.5192	-0.5527	-0.5987	-0.7114	-0.6100
3.6	-0.6326	-0.6367	-0.6826	-0.7155	-0.8329	-0.7063
3.7	-0.7509	-0.7542	-0.8155	-0.8323	-0.9544	-0.8027
3.8	-0.8692	-0.8717	-0.9522	-0.9491	-1.0759	-0.8990
3.9	-0.9874	-0.9892	-1.1012	-1.0659	-1.1974	-0.9954
4	-1.1057	-1.1067	-1.2593	-1.1827	-1.3189	-1.0917
Diámetro salida de tobera principal (mm)	1.9	2	2.12	2.2	2.3	2.4

Tabla 9.1: Datos del mapa de contorno del ratio de arrastre en función de las cotas del diámetro a la salida de la tobera principal y del diámetro del conducto de mezcla

9.2. Gráficas de funcionamiento del eyector

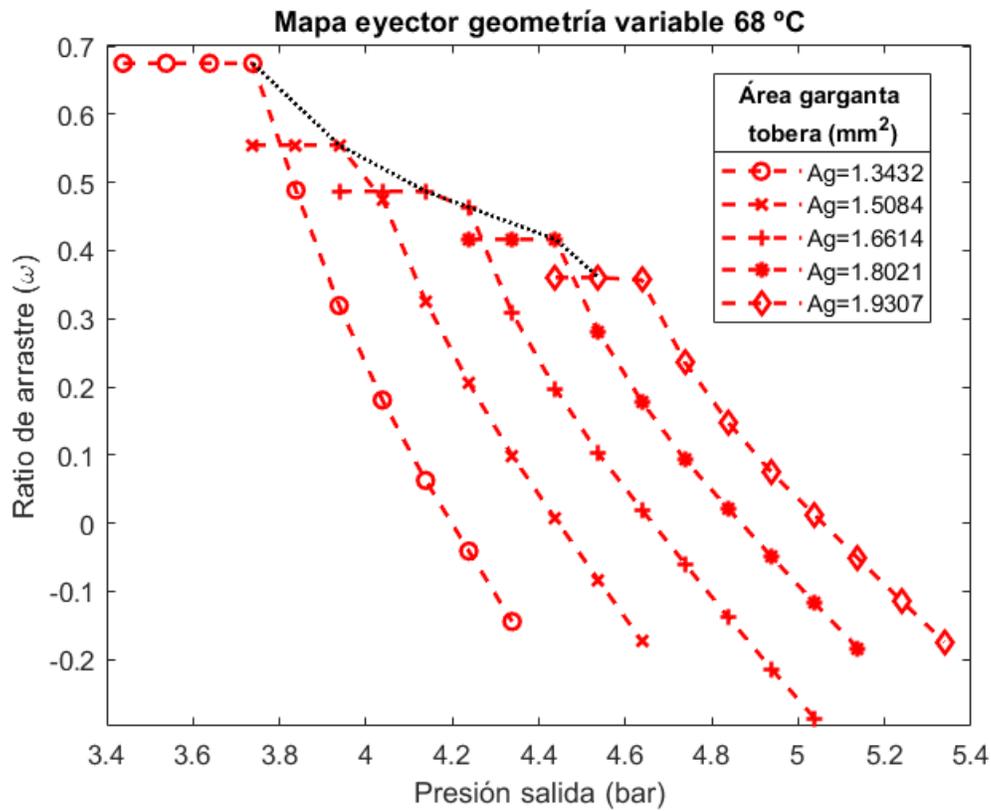


Figura 9.1: Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida y variando la posición de la aguja. Temperatura 68°C.

	Temperatura (K)	Presión (bar)
Entrada primario	341.15	9.959
Entrada secundario	293.15	2.431
Salida	-	5.038

Tabla 9.2: Condiciones de contorno que definen el problema de flujo para ambas configuraciones de eyector.

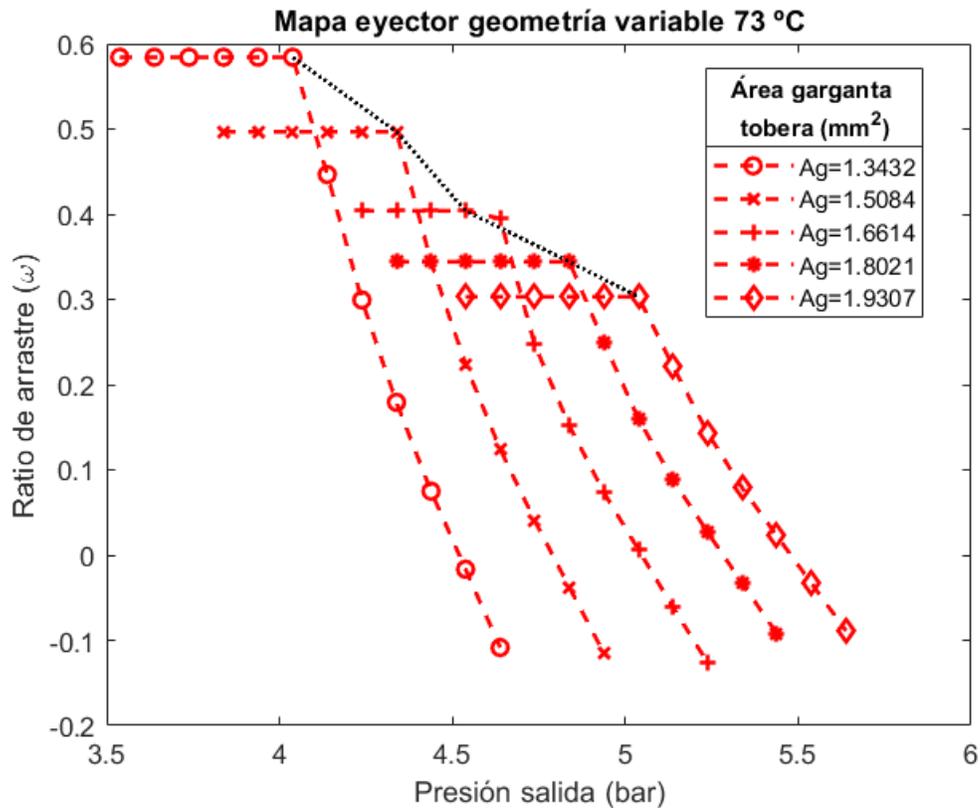


Figura 9.2: Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida y variando la posición de la aguja. Temperatura 73°C.

	Temperatura (K)	Presión (bar)
Entrada primario	346.15	11.114
Entrada secundario	293.15	2.431
Salida	-	5.038

Tabla 9.3: Condiciones de contorno que definen el problema de flujo para ambas configuraciones de eyector.

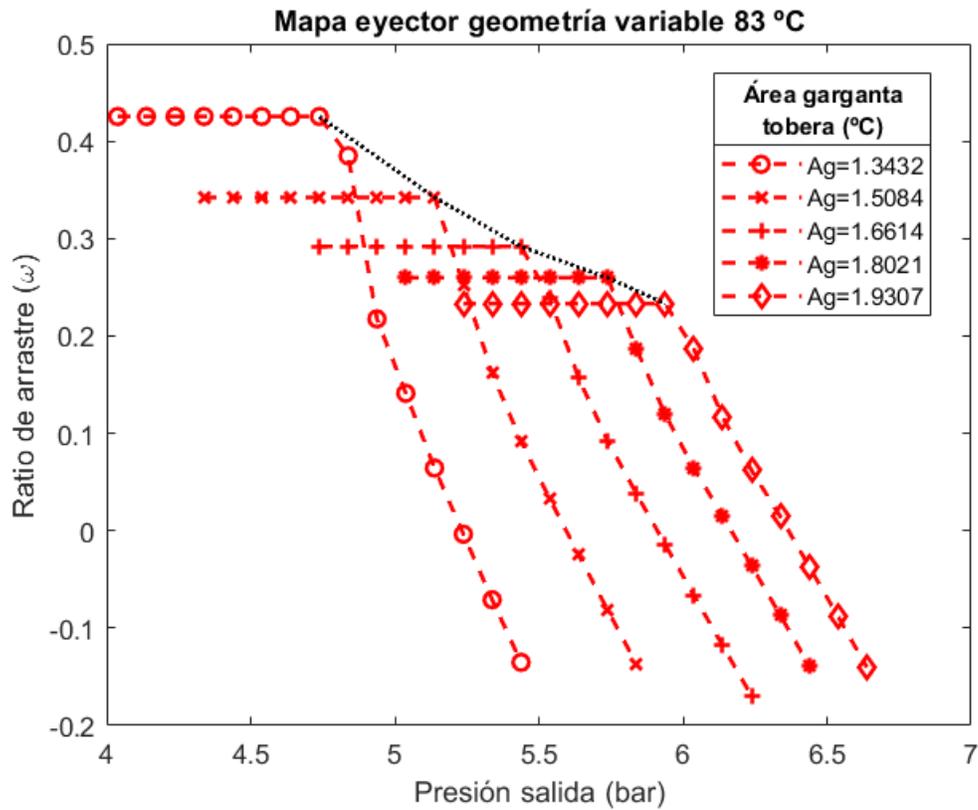


Figura 9.3: Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida y variando la posición de la aguja. Temperatura 83°C.

	Temperatura (K)	Presión (bar)
Entrada primario	356.15	13.716
Entrada secundario	293.15	2.431
Salida	-	5.038

Tabla 9.4: Condiciones de contorno que definen el problema de flujo para ambas configuraciones de eyector.

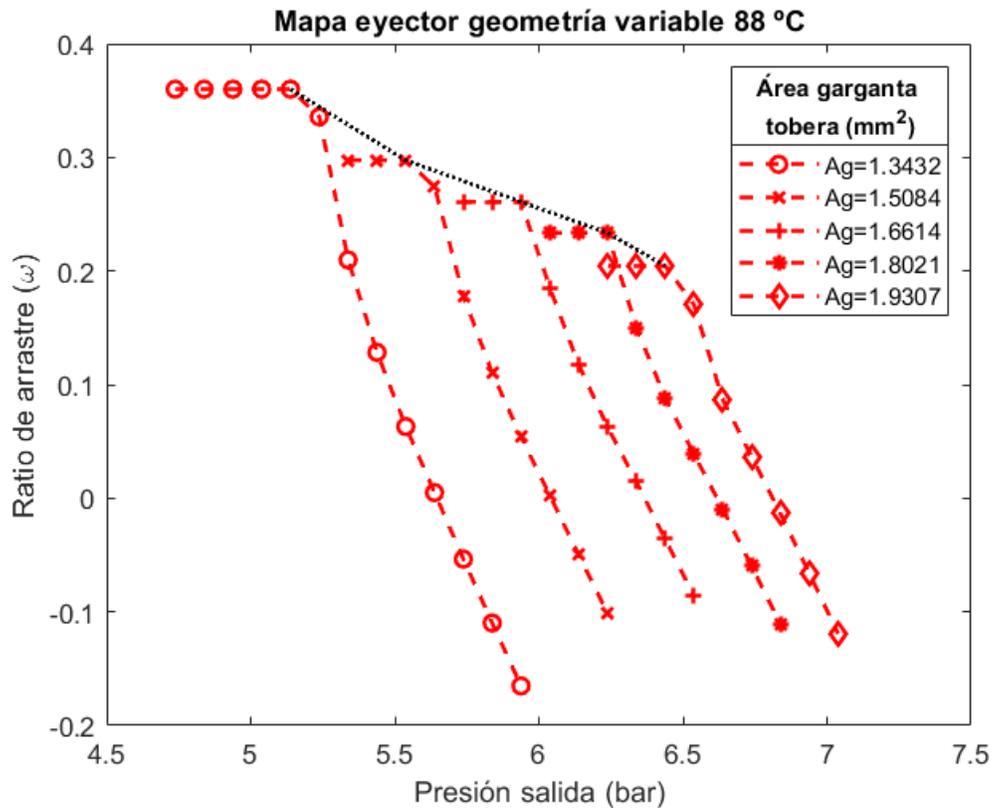


Figura 9.4: Ratio de arrastre del eyector de geometría variable en función de la variación de la presión a la salida y variando la posición de la aguja. Temperatura 88°C.

	Temperatura (K)	Presión (bar)
Entrada primario	361.15	15.174
Entrada secundario	293.15	2.431
Salida	-	5.038

Tabla 9.5: Condiciones de contorno que definen el problema de flujo para ambas configuraciones de eyector.

Capítulo 10

Pliego de condiciones

Al tratar este proyecto tanto de una parte teórica como de otra práctica, en este anexo se establecen las condiciones de uso para los posibles clientes o usuarios que realicen consultas, para establecer los derechos del autor como de los beneficiarios y la fijación de los límites de validez de las conclusiones obtenidas. Además se incluye el reglamento empleado y seguido para realizar todas las simulaciones.

Derechos de los usuarios y autor del documento

El usuario tiene derecho a emplear como documento de apoyo y consulta, además de recurrir los resultados obtenidos con tal de obtener beneficio propio a partir de ello.

El usuario con tal de disponer de los dispositivos y recursos empleados para realizar las simulaciones, con tal de realizar sus propias aplicaciones, deberá de pagar la cantidad estipulada de dinero en el apartado 3.4 Presupuesto.

El usuario tiene prohibida la reproducción de las metodologías empleadas y citadas en el texto con el fin de obtener beneficio económico.

El usuario no puede publicar fragmentos de este documento ni apropiarse de las metodologías empleadas para difundirlos a terceras personas, empresas...

El autor tiene derecho a recurrir el incumplimiento de cualquiera de las citas anteriores con penas económicas.

Validez de las conclusiones

Las conclusiones alcanzadas se han realizado siguiendo una metodología minuciosa y precisa para lo que requería la aplicación en cuestión. Hay que mencionar que el proceso seguido es de elaboración propia y no dispone de homologación alguna ni del soporte

de ninguna entidad, por lo que el autor no se hace responsable de las posibles discrepancias entre las conclusiones mencionadas y una aplicación real.

Ante cualquier duda el usuario del documento puede dirigirse a los artículos científicos, libros y enlaces consultados y que quedan referenciados en la bibliografía dispuesta al final de cada capítulo.