



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

Estudio computacional de la atomización primaria en
atomizadores de tipo pressure-swirl mediante simulaciones
de tipo LES y DNS.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Sánchez Jorge, Miguel

Tutor/a: Salvador Rubio, Francisco Javier

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial



Clean Mobility & Thermofluids

TRABAJO FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LA ATOMIZACIÓN PRIMARIA EN ATOMIZADORES DE TIPO PRESSURE-SWIRL MEDIANTE SIMULACIONES DE TIPO LES Y DNS

Autor

Miguel Sánchez Jorge

Tutor/a en UPV

Francisco Javier Salvador Rubio

4 de julio de 2024

*A toda mi familia,
en especial a mi tío Jose y mi tía Amparo*

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer el trabajo a mi tutor Javier Salvador Rubio, por darme la oportunidad de trabajar con él y aprender de CFD, consiguiendo que decida continuar mis estudios realizando el máster de CFD.

A mis compañeros de despacho, Alejandro, Alicia y Álvaro, que me han hecho estar extremadamente cómodo y acogido en el CMT. En especial a Alejandro, por dedicar tiempo a enseñarme tanto de Basilisk como Python, así como cuando tenía cualquier duda, ayudarme a solucionarla.

También quiero agradecer a mis padres por estar ahí en mis momentos de mayor estrés y frustración, ayudándome y aguantándome. En especial a mi madre por esas charlas a las tantas de las mañana cuando ya no podía más o veía que no podía.

También quiero agradecer a Mireia, mi novia, que pese a estar hasta arriba de exámenes y de estrés, me ha escuchado y ayudado como ha podido con todo.

Y por último agradecer a todos mis familiares y amigos, por aguantar mis charlas interminables sobre el proyecto, y los altibajos que pasaba con el mismo y durante la carrera, pero en especial a mi tía Pepa que me ha ayudado a corregir detalles en el trabajo y en la manera en la que me expreso.

RESUMEN

Desde el inicio del uso de turbinas de gas como en el de los reactores en la aviación moderna se han utilizado distintos modelos de atomizadores, los cuales han ido variando a lo largo del tiempo para obtener una mejor atomización del combustible. Uno de estos atomizadores de los que más se está implementando últimamente, ya sea de manera independiente o como apoyo a atomizadores más complejos como los airblast atomizers, son los conocidos como atomizadores tipo pressure-swirl o tipo simplex, los cuales introducen el combustible mediante unos canales tangenciales, que gracias a la interacción con el aire, inducen al combustible un movimiento helicoidal que mejora la mezcla del aire con el combustible y el proceso de atomización primaria, lo que deriva en mejor evaporación y mejora del proceso de combustión que acontecen tras la atomización.

Los parámetros que más afectan al proceso de atomización, a parte de la geometría misma del atomizador, son las propiedades físicas de los fluidos atomizados y las condiciones de operación (velocidad de inyección, densidad en cámara, etc.). Entre los parámetros físicos más importantes destacan la viscosidad, la densidad y la tensión superficial del combustible. Estas propiedades y las condiciones de operación están estrechamente relacionadas entre sí a través de números adimensionales, en particular, el número de Reynolds, el de Weber y el cociente de densidades combustible/aire.

Debido a la importancia que tienen los parámetros adimensionales en el proceso de la atomización del combustible, en este proyecto se ha decidido estudiar el efecto que tiene la variación de uno de estos en la atomización primaria, en particular, el número de Weber. Para esto se han utilizado técnicas de CFD, gracias a las cuales se ha podido simular la atomización de un combustible base, y otro con el número de weber mayor, sin alterar el resto de los parámetros adimensionales, asegurando así que los cambios sufridos en la atomización dependen en exclusiva a la variación del número de Weber.

Palabras Clave: pressure swirl; atomización; CFD; número de Weber; simplex; turbinas de gas; atomizadores; LES; DNS;

RESUM

Des de l'inici de l'ús de turbines de gas com en el dels reactors en l'aviació moderna, s'han utilitzat diferents models d'atomitzadors, els quals han anat variant al llarg del temps per obtenir una millor atomització del combustible. Un d'aquests atomitzadors que més s'està implementant últimament, ja sigui de manera independent o com a suport a atomitzadors més complexos com els *airblast atomizers*, són els coneguts com atomitzadors tipus *pressure-swirl* o *tipus simplex*, els quals introdueixen el combustible mitjançant uns canals tangencials, que gràcies a la interacció amb l'aire, indueixen al combustible un moviment helicoidal que millora la barreja de l'aire amb el combustible i el procés d'atomització primària, el que deriva en millor evaporació i millora del procés de combustió que es produeix després de l'atomització.

Els paràmetres que més afecten el procés d'atomització, a part de la geometria mateixa de l'atomitzador, són les propietats físiques dels fluids atomitzats i les condicions d'operació (velocitat d'injecció, densitat a la càmera, etc.). Entre els paràmetres físics més importants destaquen la viscositat, la densitat i la tensió superficial del combustible. Aquestes propietats i les condicions d'operació estan estretament relacionades entre si a través de números adimensionals, en particular, el nombre de Reynolds, el de Weber i el quocient de densitats combustible/aire.

Degut a la importància que tenen els paràmetres adimensionals en el procés de l'atomització del combustible, en aquest projecte s'ha decidit estudiar l'efecte que té la variació d'un d'aquests en l'atomització primària, en particular, el nombre de Weber. Per a això s'han utilitzat tècniques de CFD, gràcies a les quals s'ha pogut simular l'atomització d'un combustible base, i un altre amb el nombre de Weber major, sense alterar la resta dels paràmetres adimensionals, assegurant així que els canvis soferts en l'atomització depenen exclusivament de la variació del nombre de Weber.

Paraules Clau: pressure swirl; atomització; CFD; número de Weber; simplex; turbines de gas; atomitzadors; LES; DNS;

ABSTRACT

From the beginning of the use of gas turbines as well as reactors in modern aviation, different models of atomizers have been used, which have changed over time to achieve better fuel atomization. One of these atomizers that is being implemented the last times at the moment, independently or as a support for more complex atomizers such as airblast atomizers, are the ones called pressure-swirl or simplex atomizers. These introduce the fuel through tangential channels, which, through the interaction with the air, induce a helical movement in the fuel that improves the mixing of air with the fuel and the primary atomization process, leading to better evaporation and improvement of the combustion process that occurs after atomization.

The parameters that most affect the atomization process, apart from the atomizer's geometry itself, are the physical properties of the atomized fluids and the operating conditions (injection velocity, chamber density, etc.). Among the most important physical parameters are the viscosity, density, and surface tension of the fuel. These properties and the operating conditions are closely related through dimensionless numbers, in particular, the Reynolds number, the Weber number, and the fuel/air density ratio.

Due to the importance of dimensionless parameters in the fuel atomization process, this project has decided to study the effect of varying one of these parameters on primary atomization, specifically, the Weber number. For this, CFD techniques have been used, which have made it possible to simulate the atomization of a base fuel and another with a higher Weber number, without altering the rest of the dimensionless parameters, thus ensuring that the changes observed in the atomization are exclusively due to the variation of the Weber number.

Key Words: pressure swirl; atomization; CFD; Weber's number; gas turbine; atomizers; LES; DNS;

Tabla de Contenidos

I Memoria	7
II Pliego de Condiciones	80
III Presupuesto	85



Parte I
Memoria

Índice de la Memoria

1	Objetivo del proyecto	13
1.1	Objeto y justificación	13
1.2	Antecedentes	14
1.3	Estructura del proyecto	14
1.3.1	Memoria	14
1.3.2	Pliego de condiciones	15
1.3.3	Presupuesto	15
2	Marco Teórico	16
2.1	Turbinas de gas	16
2.1.1	Cámara de combustión	17
2.2	Inyectores	18
2.3	Combustión	19
2.3.1	Introducción	19
2.3.2	Combustión de Spray	20
3	Atomización	21
3.1	Definición de Atomización	21
3.2	Factores que influyen en la atomización	21
3.2.1	Propiedades del líquido	22
3.2.2	Condiciones Ambiente	22
3.2.3	Números adimensionales	23
3.3	Clasificación atomizadores	24
3.3.1	Atomizador tipo Pressure-Swirl	25
3.4	Procesos Básicos de la atomización	28
3.4.1	Formación estática de gotas	28
3.4.2	Rotura de gotas	28
3.4.2.1	Rotura de gotas en aire en movimiento	29
3.4.3	Desintegración de lámina líquida	30
3.5	Características de los <i>sprays</i>	32
4	Herramientas utilizadas. CFD y software Basilisk	35
4.1	CFD	35
4.1.1	¿Qué es el CFD?	35
4.1.2	Funcionamiento	36
4.1.3	Ecuaciones del fluido	37
4.1.4	Discretización	40
4.1.5	Cómo solucionar de las ecuaciones discretizadas	41
4.1.6	Modelos de turbulencia	42
4.1.6.1	Tratamiento de pared	43
4.1.7	Direct numerical simulation, DNS	45

4.2	Basilisk	47
4.2.1	Estructura general código Basilisk	47
4.2.2	Softwares adicionales	49
5	Desarrollo del trabajo	50
5.1	Características Físicas	50
5.1.1	Atomizador	50
5.1.2	Fluidos	52
5.2	Simulaciones	53
5.2.1	Flujo interno	53
5.2.1.1	Geometría, dominio y mallado	53
5.2.1.2	Condiciones de contorno y de inicio	53
5.2.1.3	Control y mapeado	55
5.2.2	Flujo Externo	57
5.2.2.1	Dominio y mallado	57
5.2.2.2	Condiciones de contorno	59
5.3	Postprocesado de datos	60
5.3.1	Spyder	60
5.3.2	Paraview	60
6	Análisis de Resultados	62
6.1	Análisis cuantitativo	62
6.1.1	Evolución del Número de Gotas	62
6.1.2	Número de gotas según SMD	63
6.1.3	Distancia Axial	65
6.1.4	Velocidades	69
6.2	Análisis Cualitativo	72
7	Conclusión y desarrollos futuros	76
7.1	Conclusiones	76
7.2	Futuros desarrollos	76
	Bibliografía	78

Índice de las Figuras de la Memoria

2.1	Esquema TG [1]	16
2.2	Ciclo real sencillo Bryton (no regenerativo): (a) en el plano pv; (b) en el plano Ts o hs. [1]	17
2.3	Esquema de un atomizador <i>pressure-swirl</i> [2].	18
2.4	Flujo de atomizador <i>pressure-swirl</i> totalmente desarrollado [2].	19
3.1	Ejemplos de atomizadores de rotación a) guías rectas, b) guías curvas [2]. . .	24
3.2	Ejemplos de atomizadores según su tipo a) Atom. de presión, b) Atom. de rotación c) Atom. de doble fluido[2].	25
3.3	Tipos de atomización en atomizadores tipo <i>pressure-swirl</i> [2].	26
3.4	Esquema de la forma de un atomizador tipo <i>pressure-swirl</i> simplex [2]. . . .	27
3.5	Fotografías del desarrollo del flujo de un atomizador swirl al ir aumentando la presión desde 0 [2]	27
3.6	Ilustración tipos de gotas[2]	30
3.7	Fotografía que ilustra la atomización primaria de un atomizador tipo <i>pressure-swirl</i> laminar. [2]	31
3.8	Ejemplo definición ángulo y penetración de cono en inyector diésel [2].	33
3.9	Ejemplo PDF de que muestra la probabilidad de encontrar gotas, en función de su diámetro, a diferentes distancias del orificio de salida. [3] [2].	34
4.1	Volumen mínimo, partícula de fluido [4].	38
4.2	Malla 2D o subdivisión de volumen de métodos finitos [4].	40
4.3	Ejemplo discretización elemento unidimensional [4].	41
4.4	Gráfica, zonas y^+ [5]	44
4.5	Ejemplo código #include	47
4.6	Ejemplo código #define	48
4.7	Ejemplo código condiciones de contorno	48
4.8	Ejemplo código función de lanzamiento	48
4.9	Ejemplo función para obtener capturas de imagen de la simulación.	49
5.1	Corte lateral atomizador <i>pressure-swirl</i>	50
5.2	Atomizador tipo <i>pressure swirl</i> comercial, <i>Danfoss OD-H 030H8103 oil nozzle</i>	51
5.3	Esquema datos geométricos del atomizador <i>Danfoss OD-H 030H8103 oil nozzle</i>	51
5.4	Proceso de mallado	54
5.5	Estructura de las partes del atomizador en la simulación.	54

5.6	Desarrollo diferentes etapas simulaciones de flujo interno.	56
5.7	Ejemplo estructura de árbol 2D, llamada quadtree al dividir en 4 en vez de 8 [6]	57
5.8	Transformación malla AMR caso <i>Basilisk</i>	58
5.9	Condiciones de contorno: 1) Inflow ,2) Wall , 3) Outflow	59
6.1	Evolución del número de gotas en para cada caso, a) NHeptano y b) Pseudo-We2000, y c) Comparativa.	63
6.2	Número de gotas según su SMD, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa.	64
6.3	Número de gotas según su SMD en escala logarítmica, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa.	65
6.4	Pdf según la distancia axial, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa.	66
6.5	Número de gotas según su SMD en escala logarítmica, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa.	67
6.6	Número de gotas según su SMD y el la distancia a la que se encuentran del orificio de salida, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa. . . .	68
6.7	PDFs componte U de la velocidad, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa.	69
6.8	PDFs componente azimutal y radial de la velocidad.	70
6.9	PDFs componte U de la velocidad, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa	71
6.10	Comparativa instante $t=50\mu s$	72
6.11	Comparativa instante $t=100\mu s$	73
6.12	Comparativa instante $t=300\mu s$	74

Índice de Tablas de la Memoria

5.1	Tabla de datos geométricos del atomizador <i>atomizador Danfoss OD-H 030H8103 oil nozzle</i>	52
5.2	Datos combustibles	52
7.1	Resumen Presupuesto de Computación	87
7.2	Costes por horas de cada trabajador involucrado.	87
7.3	Coste de mano de obra, resumen	87

Objetivo del proyecto

En la actualidad el estudio del proceso de atomización se ha vuelto muy importante para el desarrollo y mejora de sistemas de inyección en sistemas de combustión. Lo que se busca con estos estudios es aumentar el rendimiento de las máquinas térmicas de las que forman parte, así como la reducción de gases contaminantes mejorando y optimizando la combustión mediante una correcta mezcla de aire/combustible.

El proceso de atomización es afectado por múltiples factores, el combustible atomizado, los parámetros físicos del atomizador, o las condiciones de operación del mismo. Los números adimensionales engloban todos estos parámetros relacionándolos entre sí y sirviendo como parámetros de control de la atomización.

Pese a que el estudio del proceso de atomización es altamente complejo, gracias al desarrollo de las técnicas computacionales, específicamente al CFD o *Computational Fluid Dynamics*, se ha podido desarrollar modelos de mayor complejidad y con el nivel de precisión necesario para cada caso.

Para el proyecto presente, se ha querido buscar como afecta al desarrollo de la atomización primaria la variación del número de Weber, en un atomizador tipo *pressure-swirl* mediante el uso de técnicas computacionales.

1.1. Objeto y justificación

La combustión de combustibles líquidos en cualquier máquina térmica con llamas difusivas como es el caso de los motores diésel, en turbinas de aerorreacción, o en encendedores de chispa dependen en gran medida de una correcta atomización del combustible para un óptimo funcionamiento y para que la combustión se lo más limpia posible.

Como se demuestra en diversas publicaciones [3][2][7], la atomización no depende exclusivamente de un único factor, siendo muchos los que influyen para romper la vena líquida del fluido, además de ser diferente la importancia de su impacto según el tipo de atomizador, pudiendo afectar no solo las condiciones en las que se inyecta el combustible sino que también pueden afectar las propiedades físicas del combustible o del fluido en el que se inyecta.

Sabiendo todo lo anterior y la importancia que tiene la caracterización del comportamiento de los atomizadores, en este Trabajo Fin de Grado se ha optado por estudiar los efectos que tiene la variación del número de Weber sobre la atomización primaria en un atomizador tipo *pressure-swirl*, ya que este número adimensional engloba a múltiples parámetros físicos, como se ve en el apartado 3.2.3 .

1.2. Antecedentes

En los últimos años ha habido y hay diversos proyectos y trabajos académicos que intentan aclarar cómo funciona realmente la atomización y como le influyen diferentes parámetros físicos, así como el desarrollo de modelos matemáticos y computacionales.

Hay algunos que, sobre el mismo tema, se centran más en la validación experimental del modelo, como el de Salvador F.J., Martí-Aldaraví P., Lozano A., Taghavifar H. y, Nematí A. [3], usando en ambos casos DNS.

En otros estudios que usan cálculos de flujo para atomización se estudia el efecto de otros parámetros como es el caso del trabajo de fin de grado de Lozano A. [7], donde estudia el efecto de la turbulencia en la inyección en toberas.

Los trabajos y artículos aquí mencionados, siguen un objetivo común, todos buscan aumentar la comprensión sobre el proceso de atomización y como este es afectado por diversos parámetros y a la vez como este afecta a otros procesos, entre otros el de combustión, no obstante, estos son distintos entre ellos ya sea en los parámetros elegidos para el estudio o en lo que se busca obtener en cada uno de ellos.

1.3. Estructura del proyecto

El proyecto actual se estructura en tres documentos o partes totalmente diferenciables entre sí. El proyecto está conformado por una **Memoria**, un **Pliego de Condiciones** y un **Presupuesto**. No se ha considerado necesario un apartado de planos por la naturaleza del trabajo.

1.3.1. Memoria

Este documento engloba el desarrollo del proyecto en su totalidad. Se incluye un marco teórico para facilitar la comprensión del mismo y darle contexto, así como los procesos que se han seguido durante el proyecto y los resultados y conclusiones obtenidos del mismo. Este documento se subdivide a su vez en las siguientes 7 partes:

1. **Objetivo del proyecto:** Se hace una breve introducción al proyecto y se pone en contexto el mismo, explicando la importancia del estudio del proceso de atomización y los parámetros que afectan al proceso.
2. **Marco Teórico:** Se da contexto teórico sobre los procesos y aspectos que afectan al proyecto mediante breves explicaciones teóricas. Algunos de los temas son la inyección de combustible, la combustión por difusión y turbinas para motores de aviación.
3. **Atomización:** Se indaga más en la teoría conocida sobre el proceso de atomización y las propiedades físicas que le afectan para la correcta comprensión del trabajo.
4. **Herramientas utilizadas: CFD y software Basilisk:** Se explica de manera clara y detallada en que consiste el CFD (*Computational Fluid Dynamics*) y se explica el porqué de la utilización como la herramienta principal, el software *Basilisk*.
5. **Descripción del trabajo:** Se explica cómo se ha procedido en el trabajo para obtener los resultados que se buscaban analizar.
6. **Análisis de resultados:** Se exponen los resultados que se han obtenido de manera clara y concisa, junto al análisis de los mismos.
7. **Conclusiones y futuros desarrollos:** Tras el análisis de los resultados se aportan conclusiones que sirvan de base para futuros estudios y proyectos sobre el mismo tema o similares.

1.3.2. Pliego de condiciones

En este documento se plantean las limitaciones y exigencias que se han tenido durante la realización del proyecto, siendo estas de tipo técnico y legal, añadiendo también información relacionada con el entorno y el material usado.

1.3.3. Presupuesto

En este último documento se va exponer el coste teórico de la realización del trabajo, tanto por horas de mano de obra, como por material físico y digital utilizado, llegando al valor económico hipotético de un proyecto de características similares a las de este.

Marco Teórico

En este apartado se va a proceder a establecer un contexto teórico sobre el proyecto, con el fin de exponer la importancia que tiene la caracterización de los efectos que tienen la variación del número de Weber en la atomización de los atomizadores tipo *pressure-swirl*. En primer lugar, se establecerá dentro de las turbinas de gas, qué importancia tiene la inyección de combustible y la atomización del combustible. Posteriormente se va a pasar a la explicación de la combustión difusiva, que es la que se produce en general en este tipo de turbinas, y la importancia que tiene la correcta atomización en la misma. A continuación se procederá a explicar en qué consiste la inyección de combustible, en especial los motores de turbina de gas para aviación.

2.1. Turbinas de gas

Las **Turbinas de gas**, en su expresión esquemática más simple, como se puede ver en la figura 2.1 se trata de un motor de combustión interna de ciclo abierto, compuesto por un compresor, una cámara de combustión y una turbina de gas propiamente dicha.

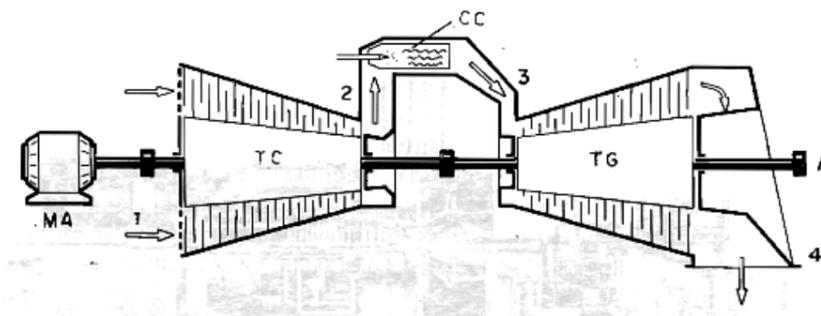


Figura 2.1: Esquema TG [1]

El funcionamiento de la turbina de gas presentada en el esquema es el siguiente:

1. Entra gas atmosférico por la unidad compresor, que es accionada mediante el grupo turbina de gas.

2. Los gases comprimidos del compresor, se introducen en la cámara de combustión, donde se inyecta y quema el combustible, aumentando la temperatura sin prácticamente variación de presión.
3. Tras esto la mezcla de gases atmosféricos junto a los productos de la combustión a alta temperatura y presión, pasan al grupo turbina, donde cede potencia a la misma para accionar el grupo compresor y lo sobrante al eje, en caso de tener uno.
4. Por último los gases de escape se expulsan fuera del grupo turbina [1].

2.1.1. Cámara de combustión

En las turbinas de gas el principal aporte de energía se da en la cámara de combustión, siendo el aporte energético de la combustión observable en la figura 2.2 entre los puntos 2-3. Debido a lo comentado, los procesos y los parámetros que afectan a la combustión son de muy alta importancia para el óptimo funcionamiento de la turbina de gas en su conjunto. También se puede obtener la importancia de la combustión mediante la observación de cómo

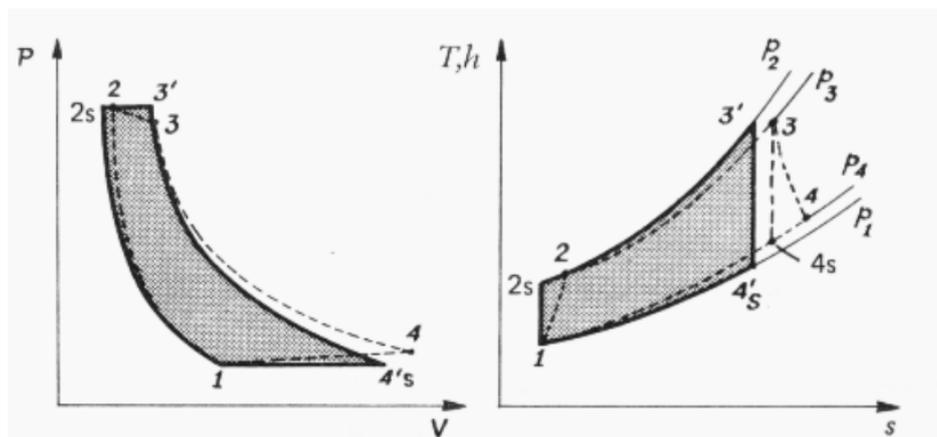


Figura 2.2: Ciclo real sencillo Bryton (no regenerativo): (a) en el plano pv; (b) en el plano Ts o hs. [1]

se obtiene el rendimiento térmico en estas máquinas de manera teórica, siendo el rendimiento térmico η_t y definiendo:

- Q_a = Calor absorbido en la combustión.
- W_t = Trabajo que absorbido por la turbina.
- W_c = Trabajo realizado por el compresor.

$$\eta_t = (W_t - W_c)/Q_a \quad (2.1)$$

La manera en la que se atomiza el combustible no únicamente afecta a la calidad de la combustión, si no que obliga a modificar los parámetros de la cámara de combustión, o bien esta limita de alguna manera cómo se tiene que dar a la atomización.

2.2. Inyectores

Los inyectores son parte integral de la cámara de combustión dentro de casi cualquier motor térmico y por lo tanto componente obligatorio de las turbinas de gas. También tienen otras aplicaciones a parte de la combustión, como pueden ser aerosoles o algunas aplicaciones médicas.

En la combustión la función de los mismos es la de introducir el combustible en la cámara de combustión, además de atomizarlo para facilitar la evaporación del combustible y para que posteriormente se dé la mezcla aire-combustible. El más común utilizado para turbinas de gas es el inyector centrífugo o de *swirl* [1]. Están formados por un orificio de salida, el cual esta precedido por una cámara de *swirl*, en la cual se introduce el combustible por conductos o aberturas tangenciales. Gracias a los conductos laterales se hace girar el combustible creando un vórtice en el interior de la cámara de *swirl*, pegando el combustible a las paredes de la cámara. Por el orificio de salida el fluido sale en forma de lámina anular, el ángulo de salida varía en función del ámbito en el que se vaya a utilizar el inyector [2]. El atomizador que se va a estudiar en este proyecto es del tipo de los mencionados anteriormente, se hará una descripción más detallada del atomizador estudiado en el capítulo 5: *Descripción del trabajo*.

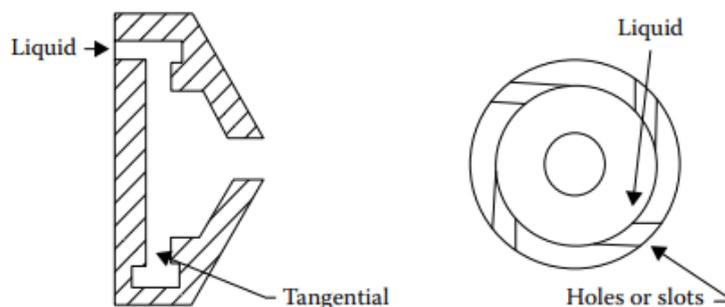


Figura 2.3: Esquema de un atomizador *pressure-swirl* [2].

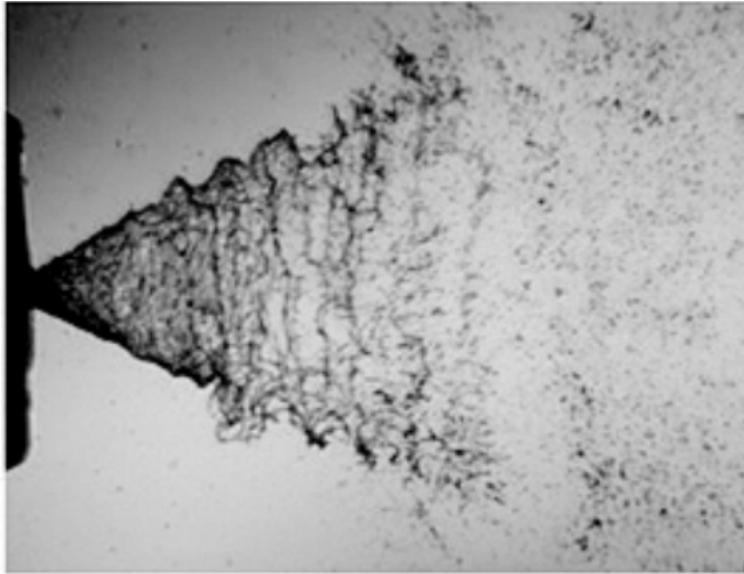


Figura 2.4: Flujo de atomizador *pressure-swirl* totalmente desarrollado [2].

2.3. Combustión

2.3.1. Introducción

Se entiende como combustión, una reacción química exotérmica de oxidación que se da entre algunos componentes de los combustibles con el oxígeno de la atmósfera. Aunque el combustible pueda ser sólido, líquido o gaseoso, los componentes del mismo que reaccionan con el comburente tienen que estar en estado gaseoso. En las TG se usan en general combustibles de origen orgánico, que están compuestos en su mayoría por carbono C, hidrógeno H, oxígeno O y azufre S [1].

Durante la combustión se dan una serie de procesos. En primer lugar, se da una disociación de los componentes del combustible, posteriormente estos reaccionan con el comburente generando los que se conoce como radicales, tras esto comienza la reacción de oxidación propiamente dicha y es donde se produce la principal liberación de energía, además de generarse los productos finales de la reacción de combustión. [8]

Dentro de los tipos de combustión, en función de cuando se haya realizado el proceso de combustión, se pueden distinguir dos tipos de combustión:

- **Llama premezclada:** Se da cuando el combustible y el aire se introducen por el mismo flujo, es decir como su propio nombre indica la mezcla combustible-aire se da previa a la reacción de combustión.
- **Llama de difusión:** Se da cuando el combustible se introduce de manera independiente al aire, o directamente sobre un medio en el cual hay aire estático, estando

por lo tanto, combustible y comburente separados, dándose la reacción química de combustión y la mezcla de combustible y comburente de manera simultánea.[8]

En el caso estudiado se da una llama difusiva, ya que el atomizador introduce únicamente el combustible en la cámara de combustión de la turbina de gas, y es en la misma cámara de combustión donde posteriormente se mezcla el combustible con el aire que viene del compresor y se realizará la combustión, como se explica en el punto 2.1.

2.3.2. Combustión de Spray

Muchas e importantes aplicaciones, entre las que se encuentran la cámara de combustión de las turbinas de gas, conllevan la combustión de combustible sólido o líquido, usando generalmente aire como comburente. Entendiendo *spray* como cualquier sistema con un número de partículas tal que solo una descripción estadística del mismo es posible [8], por lo que en el caso de que se trate de un líquido, el *spray*, es el sistema que se formaría tras la atomización de dicho fluido. A esta combustión sería más correcto llamarla combustión de dos fases, ya que una fase condensada, la líquida, se introduce en una fase gas.

Dentro de este tipo de combustión se puede diferenciar la siguiente secuencia de procesos:[8]

1. Inyección y atomización del combustible líquido.
2. Mezcla de gotas de combustible con el gas oxidante.
3. Transmisión de calor a las gotas provocando su vaporización.
4. Mezcla vapor de combustible con el gas.
5. Ignición de la mezcla, o por acción de un actuador externo o por autoencendido de la mezcla.

Como se puede observar la atomización del combustible es parte fundamental para este tipo de combustión, ya que las características físicas de las gotas que se generen durante la atomización afectarán al resto del proceso y por lo tanto a la calidad final de la combustión.

Atomización

Durante todo el capítulo anterior, se ha destacado la importancia de la atomización para el proceso de combustión dentro de la cámara de combustión de una turbina de gas. En este capítulo por lo tanto, se incide más en la importancia del mismo y se explica como tal, de que se trata el proceso de atomización, los parámetros que afectan al proceso y las características de los *sprays* generados por la atomización.

3.1. Definición de Atomización

Se entiende como atomización, la transformación de un volumen líquido en un *spray* y otras dispersiones físicas de pequeñas partículas en una atmósfera gaseosa [2]. Como se ha comentado en el capítulo anterior este fenómeno es de gran interés industrial, no únicamente en el campo de la combustión, como previamente se ha mencionado, si no que tiene gran utilidad en otros ámbitos, ya sea en la industria química, por la necesidad de que reactivos estén en condiciones específicas para su correcta reacción, la textil o en la fabricación de piezas, pinturas y capas protectoras para ciertos materiales que necesitan de la correcta atomización de sus componentes para conseguir los acabados uniformes deseados.

En el proceso de atomización un chorro o una lámina líquidos son desintegrados, la desintegración se da bien por la exposición a un flujo de aire o gas a alta velocidad, o bien por el aporte de energía mecánica mediante un aparato de rotación o de vibración [2]. La naturaleza aleatoria del proceso junto a las múltiples maneras en las que se puede dar el proceso de atomización complica en gran medida el estudio de este proceso, de ahí que aun no haya ninguna teoría que unifique el proceso de atomización, debido a esto, el uso de CFD ha ido en aumento en el estudio de los factores que afectan a la atomización, gracias a esto se pueden obtener datos, no solo del resultado final de la atomización sino que también se pueden obtener datos de cómo se desarrollan las diferentes fases del proceso.

3.2. Factores que influyen en la atomización

Cualquier atomizador, pese a la complejidad del mismo y de su tipo, depende de las características físicas del fluido atomizado, las características físicas del medio en el que se va a atomizar y de la geometría y dimensiones del atomizador empleado. En los siguientes

apartados se va a explicar cómo afectan los factores previamente nombrados, a excepción de la geometría, está se explicará en el apartado 3.3.1., ya que es donde se indaga más en las características del tipo de atomizador que se va a estudiar.

3.2.1. Propiedades del líquido

El flujo y el *spray* tienen sus características condicionadas en gran parte por la densidad, la viscosidad y la tensión superficial del líquido atomizado.

La **densidad** es imposible desligarla de las otras dos variables en la práctica, además la poca variación de densidad entre líquidos y la poca bibliografía respecto a los efectos de la misma sobre la atomización, indican la baja importancia que tiene la misma.

El aumento de la relación área/volumen de líquido es considerado un indicador de calidad en la atomización, esto se debe a que un aumento del área para un mismo volumen, nos indica que este se ha fragmentado en un mayor número de partes, lo que en atomización nos indicaría por una parte un mayor número de gotas y de menor tamaño. La **tensión superficial** del líquido es importante para lo antes mencionado, ya que representa las fuerzas que resisten la formación de nuevas superficies, es decir evita la partición del fluido en partes de menor volumen.

La **viscosidad** del fluido atomizado basa su importancia en que afecta tanto a la creación de nuevas superficies, como lo hace la tensión superficial, como al flujo en el atomizador y al patrón generado en el *spray*. La viscosidad está estrechamente relacionada con el número de Reynolds, por lo que la variación de esta, desemboca en la variación del tamaño de gota y del tiempo que tarda en aparecer las gotas. Pese a que el efecto de la viscosidad dentro del flujo del atomizador es importante, este es complejo y complicado de estudiar ya que el efecto varía en función del tipo de atomizador, en el caso de los tipos *pressure-swirl* el incremento de viscosidad estrecha el ángulo de atomización generalmente. En cualquier caso, a menor viscosidad la calidad de la atomización aumentará [2].

Para el análisis de cualquier caso de atomización es importante no solo las características del fluido anteriormente descritas, ya que otras, como la temperatura o la presión a la que se encuentra, afectan a las anteriormente mencionadas.

3.2.2. Condiciones Ambiente

El aire o gas ambiente en el que se atomiza el fluido varía en presión y temperatura, esta variación es bastante grande en sistemas de combustión. Para los atomizadores tipo *pressure-swirl*, la **densidad** del fluido ambiente es bastante importante ya que con el aumento de la misma el ángulo de dispersión disminuye hasta un ángulo mínimo a partir del que no disminuye más.

La **presión** ambiente también afecta a la creación de gotas, ya que si se aumenta desde

el valor de presión atmosférica, el tamaño medio de gotas va aumentando hasta llegar un punto de presión máxima donde el tamaño medio de gota comienza a disminuir lentamente[2].

3.2.3. Números adimensionales

Los números adimensionales, son parámetros que permiten relacionar las características físicas de los fluidos atomizados con las condiciones de trabajo a las que opera el atomizador. Estos son bastante importantes ya que nos permiten un análisis y control de la atomización de manera global y sin depender de unidades. Entre estos parámetros destacan el número de Reynolds, el número de Weber y el coeficiente de densidades combustible/aire.

El número de **Reynolds** nos indica el nivel de turbulencia del fluido, indicando por una parte si se trata de turbulento o laminar, además del nivel de turbulencia del fluido, este está estrechamente relacionado con la viscosidad, tanto cinemática como dinámica, como se ha comentado en el apartado anterior; pero además también se relaciona con la velocidad del fluido y la longitud características del atomizador. Un aumento de este provoca un aumento de la turbulencia del fluido y por lo tanto una mejor atomización.

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} = \frac{D v}{\nu}$$

$Re \rightarrow$ Número de Reynolds
 $\rho \rightarrow$ Densidad del fluido
 $D \rightarrow$ Diámetro característico
 $v \rightarrow$ Velocidad del fluido
 $\mu \rightarrow$ Viscosidad dinámica
 $\nu \rightarrow$ Viscosidad cinemática

(3.1)

El número de **Weber**, nos relaciona las fuerzas inerciales que actúan sobre fluido con la tensión superficial del mismo, teniendo en cuenta esto se puede indicar que el número de weber relaciona la velocidad a la que se introduce el fluido con la tensión superficial del mismo, siendo esto muy importante ya que la variación del mismo con un caudal constante provocará que varíe el tamaño de gota mínimo, así como la cantidad de gotas. En la ecuación 3.2 se observa la relación que existe entre el número de Weber y distintos parámetros, observándose que al reducirlo aumentará la tensión superficial y por lo tanto le costará más generar gotas.

$$We = \frac{\rho v^2 l}{\sigma}$$

$l \rightarrow$ Longitud característica
 $\sigma \rightarrow$ Tensión superficial del fluido

(3.2)

El **cociente de densidades** combustible/aire, como su mismo nombre indica, establece la relación de las densidades de los fluidos que interactúan durante la atomización, esto permite predecir como va a afectar la densidad del fluido atomizado incluso aunque la densidad del medio sobre el que se efectúa la atomización no sea la misma siempre.

3.3. Clasificación atomizadores

Para la generación de un *spray*, todo lo que se necesita es una velocidad relativa bastante alta, entre el fluido atomizado y el gas ambiente que sobre el que se atomiza. Teniendo esto en cuenta se puede clasificar el tipo de atomización como aquellos que inyectan combustible a alta velocidad sobre aire o gas a poca o nula velocidad, y los que utilizan el aire para atomizar el combustible.

Dentro de los que inyectan el combustible a alta velocidad podemos distinguir:

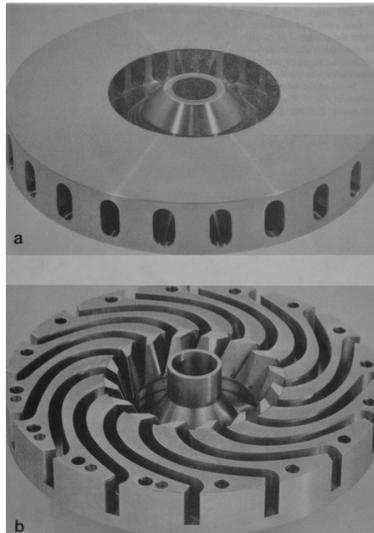


Figura 3.1: Ejemplos de atomizadores de rotación a) guías rectas, b) guías curvas [2].

- **Atomizadores de presión:** El líquido se introduce por una pequeña apertura a una alta presión, una vez salido del agujero la energía que se le aporta al flujo mediante la presión de inyección se transforma en energía cinética. Dentro de estos encontramos los de tipo *pressure-swirl*, explicados más a detalle en el apartado 3.3.1.
- **Atomizadores de rotación:** En estos atomizadores se le introduce energía cinética mediante un aparato que haga rotar a alta velocidad el fluido, tras esto el líquido se descarga por la periferia del atomizador, se ve un ejemplo de este tipo de atomizadores en la figura 3.1.

Dentro de los que se introduce el fluido a baja velocidad y se les introduce a un flujo de aire a alta velocidad se pueden distinguir:

- **Atomizadores asistidos por aire:** El atomizador está expuesto a una corriente de aire a alta velocidad. Dentro se pueden distinguir, la mezcla interna del combustible y el flujo de aire, de tal manera que se mezcla el combustible y el aire a alta velocidad antes de salir del orificio de la descarga, de mezcla externa, se expulsa el combustible y el aire a alta velocidad los arrastra. Estos son bastante ineficientes desde el punto de vista energética, no obstante, genera gotas de menor tamaño que los de presión simple.

- **Atomizadores *Airblast*:** Estos se distinguen de los anteriores en que los asistidos por aire usan una pequeña cantidad de aire a muy alta velocidad y los segundos usan altas cantidades de aire a bajas velocidades, en comparación a los anteriores.

Por último, quedan algunos atomizadores que quedan fuera de los anteriormente mencionados, estos son poco utilizados ya que sirven para aplicaciones muy concretas, entre estos se encuentran los electro-estáticos, los ultrasónicos, los sónicos (o de silbido) o los vibratorios, entre otros. En muchas aplicaciones pueden llegar a utilizarse atomizadores de múltiples tipos en conjunto.

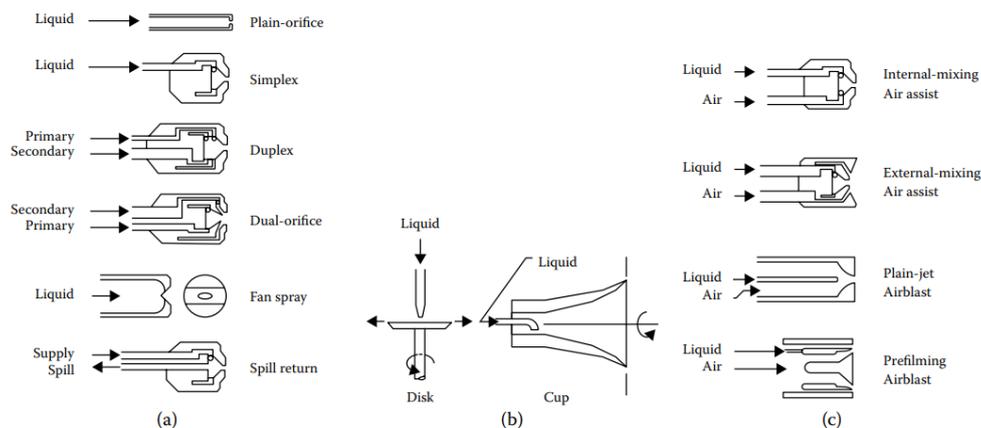


Figura 3.2: Ejemplos de atomizadores según su tipo a) Atom. de presión, b) Atom. de rotación c) Atom. de doble fluido[2].

3.3.1. Atomizador tipo Pressure-Swirl

Dentro de los atomizadores de presión se pueden encontrar varios tipos entre los que se va a destacar los atomizadores conocidos como *pressure-swirl* o *simplex*. Estos se componen por una cámara de *swirl* o de vórtice seguida por una un orificio de salida por donde sale el fluido en forma de cono, el ángulo del cono es variable y suele ir de entre 30° a 180° . La atomización en estos atomizadores es generalmente buena, pero se obtiene la atomización de gotas de menor tamaño con grandes presiones de entrega y con ángulos de gran apertura. Se pueden diferenciar diversos tipos básicos según la forma del fluido que generan a la salida del atomizador.

- ***Solid cone Spray*:** Las gotas generadas a la salida del atomizador se distribuyen uniformemente a lo largo de todo el volumen del cono generado.
- ***Hollow cone Spray*:** En estos las gotas en vez de distribuirse a lo largo de todo el volumen, se concentran en el exterior del mismo, como se muestra en la figura 3.3.

Los atomizadores de tipo *hollow cone* generan una atomización mejor que los de tipo *solid cone*, y su distribución radial, con el hueco dentro, es bastante favorable en las numerosas

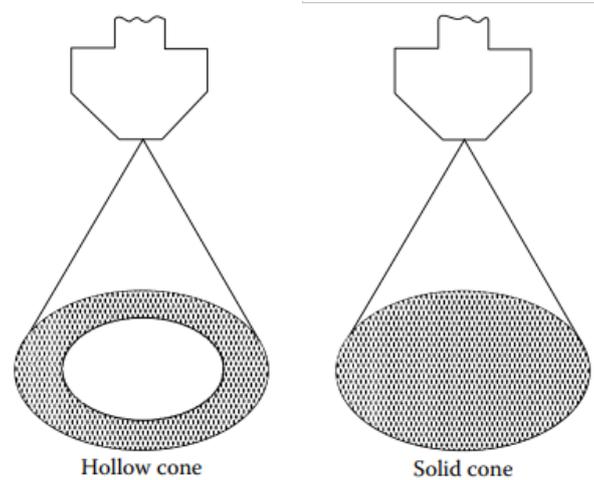


Figura 3.3: Tipos de atomización en atomizadores tipo *pressure-swirl*[2].

aplicaciones, sobre todo en los sistemas de combustión.

Los tipos más básicos de *hollow cone* tienen unos puertos de entrada tangencial a la cámara de *swirl*, la entrada de combustible por estos puertos le infiere al combustible una alta velocidad angular, creando ya dentro de la cámara el cono vacío que los caracteriza. A la salida del orificio el líquido afectado por las fuerzas axiales y radiales genera una lámina de combustible, cuyo ángulo de dispersión está definido por los componentes axiales y tangenciales de la velocidad que gobierna la lámina del combustible.

El desarrollo de esta lámina y por lo tanto del flujo de combustible, se desarrolla mediante una serie de pasos cuando la presión aumenta hasta el punto de funcionamiento desde cero.

1. Comienza a generar pequeñas gotas.
2. Se genera un haz distorsionado.
3. Se genera un cono a la salida del orificio, pero que debido a las tensiones superficiales fuerzan al cono a cerrarse formando una burbuja cerrada.
4. Se abre la burbuja en forma de flor con el borde irregular; desde el borde empieza a desintegrarse la lámina en gotas relativamente grandes.
5. La curva en forma de flor se endereza, generando la lámina cónica característica de este tipo de atomizador. Tras esto la se reduce el grosor de la lámina y consecuentemente comienza a desintegrarse en ligamentos y posteriormente en gotas.

En la figura 3.5 se puede observar las distintas fases descritas.

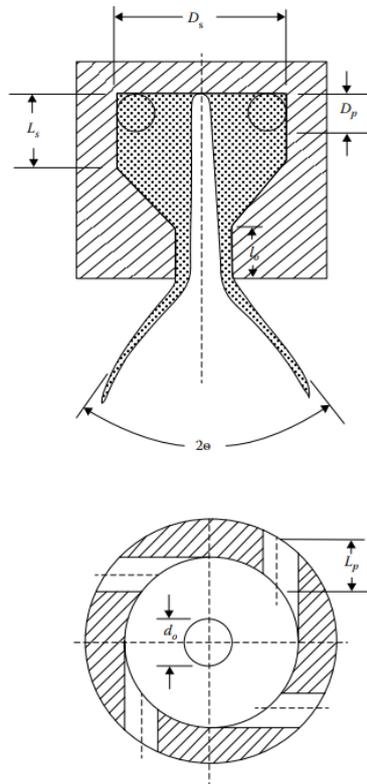


Figura 3.4: Esquema de la forma de un atomizador tipo pressure-swirl simplex [2].

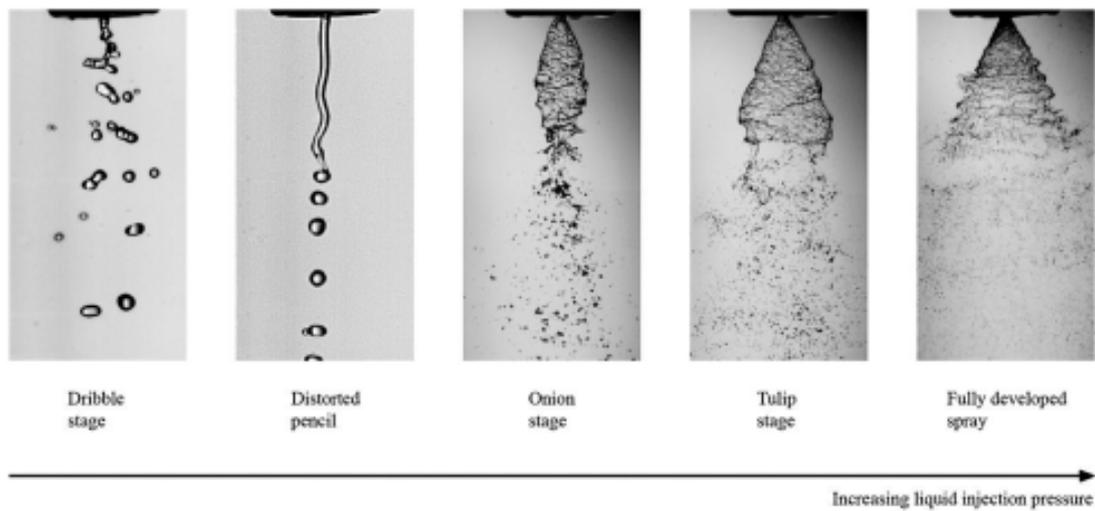


Figura 3.5: Fotografías del desarrollo del flujo de un atomizador swirl al ir aumentando la presión desde 0 [2]

3.4. Procesos Básicos de la atomización

El proceso de atomización se puede definir, como convertir un volumen de líquido que se desintegra en pequeñas gotas. La manera en que se da esto es mediante la oposición, hasta superarla, de la acción unificadora de la tensión superficial mediante la acción de agentes internos y externos. En caso de que no existan las acciones que se opongan a la tensión superficial, la tensión superficial tiende darle forma de esfera al volumen de fluido, la viscosidad del líquido estabiliza la masa de líquido ejerciendo oposición a la variación de geometría. Entre las acciones que crean las inestabilidades en las gotas, las fuerzas aerodinámicas sobre la superficie de líquido son principales para la formación de las gotas.

Las gotas creadas en primera instancia, las más grandes que se generan, tienen mucha inestabilidad por lo que de manera consecuente se volverán a desintegrar en gotas más pequeñas. Debido a lo previamente explicado, se puede ver que el tamaño final de las gotas que se generen depende tanto de la atomización primaria, que es en la que se alcanza como el conocido tamaño crítico de gotas, como de la secundaria, que se da cuando las gotas llegan a reducir su tamaño por debajo del tamaño crítico.

3.4.1. Formación estática de gotas

Previamente a la explicación de los procesos más complejos se explicará la formación de gotas en su caso más simple. Este caso es el cuasi-estático de una gota colgando. Esto se vería claramente en cualquier aparato que gotee o que tenga una pequeña lámina de agua que va hacia abajo, en esta, la gravedad realiza la acción desestabilizadora sobre el volumen de agua, en el momento que esta acción supera a la tensión superficial, una pequeña parte del volumen se desprende y genera una gota. Este es el método más básico de atomización y el más común en la naturaleza y aunque no sea útil en aplicaciones industriales, ayuda al entendimiento de cómo funciona la desintegración del fluido en gotas.[2]

3.4.2. Rotura de gotas

En el caso más común en la industria, que es el que se da en el caso de estudio en este trabajo, se da la interacción del fluido con el aire atomizándolo. Cuando la atomización se da por la interacción del líquido con el aire hay muchos mecanismos involucrados. Para conocer todas las maneras en que las gotas se pueden formar al entrar en contacto con el aire, haría falta saber a la perfección como actúan las fuerzas aerodinámicas sobre las gotas, esto es extremadamente complejo ya que con la acción misma de las fuerzas aerodinámicas, se deforman las gotas y por lo tanto cambian las acciones que se generan sobre sus superficies. Estas deformaciones también modifican las fuerzas internas, lo que aumenta aún más lo complejo de una solución matemática rigurosa [2].

Para comprender bien cómo funciona el mecanismo de generación de gotas hay que definir lo siguiente; la presión interna sobre cualquier punto de la superficie, p_I , es una constante y es suficiente para balancear la presión ejercida por las fuerzas aerodinámicas, p_A y la

presión generada por la tensión superficial, p_σ , de tal manera que

$$p_I = cte = p_A + p_\sigma \quad (3.3)$$

Viendo esto, siempre que el aumento o la disminución de las presiones, aerodinámicas o de las tensiones superficiales, sea compensado por la otra y mantengan constante la presión interna, no se generan gotas. No obstante, cuando p_A es grande, en comparación a p_σ , un cambio en p_A no puede ser compensado por p_σ y por lo tanto p_I no se puede mantener constante. Esto produce que la gota comience a deformarse hasta que se desintegre en gotas de menor tamaño. La presión debida a la tensión superficial se puede definir en gotas esféricas como:

$$p_\sigma = \frac{4\sigma}{D} \quad (3.4)$$

Es por lo tanto observable que cada vez que se desintegra una gota p_σ aumenta para las nuevas gotas, este aumento de presión provoca que una vez que p_σ sea lo suficientemente grande pueda asumir las variaciones de p_A evitando por lo tanto la aparición de nuevas gotas [2].

Estas observaciones ayudan a definir lo que se conoce como **tamaño crítico de gota**, siendo este el menor tamaño de gota que puede alcanzar el fluido en unas condiciones. Esto establece además que el tiempo de formación de gotas va aumentando a medida que va reduciéndose el tamaño de las gotas. Al tiempo de formación de gotas también afecta la viscosidad, ya que como se explicado previamente esta se opone a la deformación de la gota. Además, respecto al tiempo de creación de gotas, aunque p_A inicialmente sea suficiente para desintegrar las gotas, si p_A disminuye antes de que se forme la gota, si esta disminuye lo suficiente la rotura no se dará.

3.4.2.1. Rotura de gotas en aire en movimiento

El estudio de este caso se ha realizado en muchos casos, y es lo mismo que si en vez de mover un gran flujo de aire sobre un fluido, se mueve a alta velocidad un fluido a través de aire. Multitud fotografías de alta velocidad [2] indican que las maneras en que se atomiza un volumen de líquido depende del flujo de aire relativo que se genera a su alrededor. No obstante, se han definido 3 tipos básicos [2]:

1. **Lenticular**: la gota se aplana por los polos de tal manera que adopta la forma de un elipsoide. Se cree que este elipsoide se acaba convirtiendo en un toroide estrechándose hasta desintegrarse.
2. **Cigar-shaped**: la gota se va alargando de forma cilíndrica hasta que se rompe los ligamentos generando nuevas gotas.
3. **Amorfa**: En esta las acciones internas y externas le generan protuberancias que poco a poco irán separándose de la gota original.

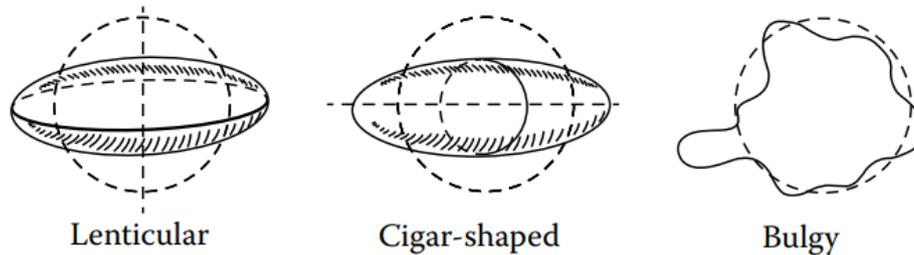


Figura 3.6: Ilustración tipos de gotas[2]

Resumiendo, la desintegración de las gotas sometidas a un chorro de aire, o que fluyen a alta velocidad sobre aire, depende de la presión dinámica, la tensión superficial y las fuerzas viscosas.

3.4.3. Desintegración de lámina líquida

La manera en la que se desintegra el fluido en un atomizador, depende en gran parte de la manera en la que sale el fluido por el orificio de salida, en *jets* o en lámina, como el atomizador estudiado en el trabajo se genera un flujo de tipo laminar se va explicar el desarrollo de este.

El desarrollo de la lámina esta principalmente controlada por la velocidad a la salida del orificio y de las propiedades físicas del fluido. Tendiendo lo anterior en cuenta se puede entender que para permitir que la lámina se expanda, es necesario una velocidad mínima para vencer a la tensión superficial que la contrae, esta velocidad en el caso de los *pressure-swirl* viene dada de por la presión a la que se introduce el combustible. Aumentar la velocidad aumenta la longitud de la lámina, que alcanza una longitud máxima donde se genera un *borde* o *frontera* donde se estabilizan las fuerzas inerciales y la tensión superficial.

Se pueden distinguir tres modos o maneras en las que se pueden desintegrar las láminas llamados

- *Rim*
- *Wave*
- *Perforated-sheet*

Modo rim, en este modo las fuerzas provocan que en el extremo libre de la lámina se genere un borde grueso, este borde se desintegra igual que un *jet*, en este las fuerzas disruptivas y de cohesión interactúan entre sí de tal manera que provocan inestabilidades en el flujo que se manifiestan como oscilaciones, provocando que finalmente se desintegre en gotas.

Modo perforated-sheet, en este tipo de desintegración aparecen agujeros en la lámina empujando el fluido que se encontraba originalmente dentro de estos al borde de los mismos, estos agujeros aumentan de tamaño y cantidad hasta que los bordes de los agujeros continuos colapsan entre sí, formando ligamentos que posteriormente producen las gotas al desintegrarse, como sucede en el modo *rim*.

Modo wave, se genera una onda de movimiento en la lámina tal, que en los puntos de la lámina que se encuentran a longitud de onda o mitad de longitud de onda, partes de la lámina son despegadas sin llegar al borde de la lámina, estos fragmentos arrancados se desintegran por la presión aerodinámica o la turbulencia interna de las gotas generadas.

Generalmente las láminas que se generan en los atomizadores pueden presentar los tres modos de desintegración, muchas veces se presentan dos modos de manera simultánea, influyendo cada uno de los modos al tamaño medio de gota y la distribución de las mismas en función de la importancia que tenga cada uno de los modos en el proceso de atomización.

En la siguiente figura se observa, por un lado, las oscilaciones comentadas en el modo *wave*, así como los agujeros que son característicos del modo *perforated-sheet*

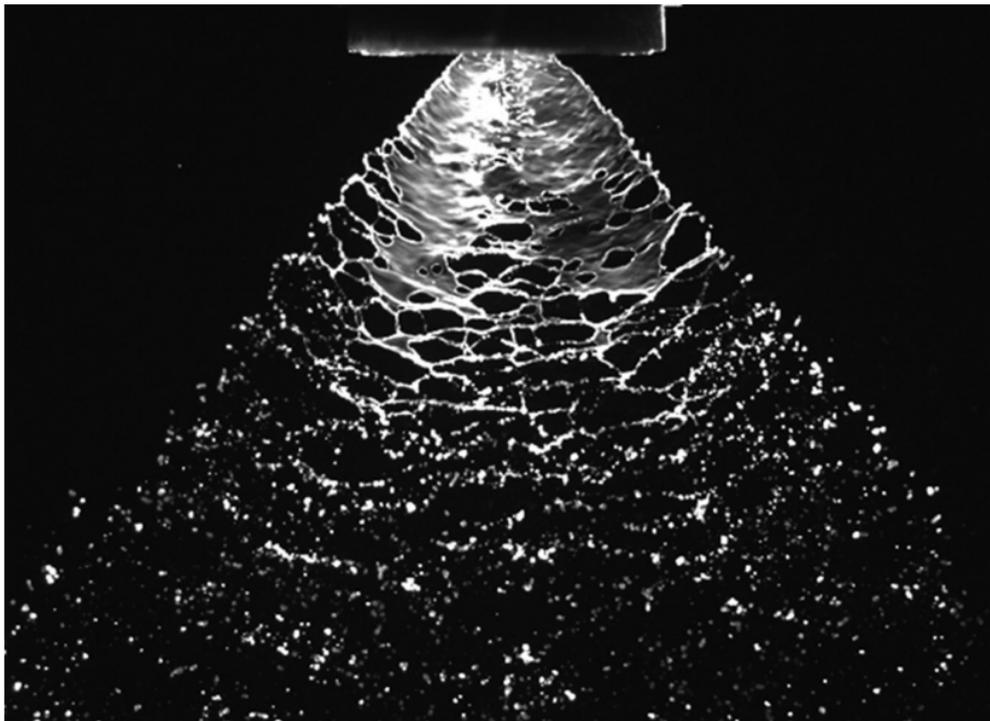


Figura 3.7: Fotografía que ilustra la atomización primaria de un atomizador tipo *pressure-swirl laminar*. [2]

3.5. Características de los *sprays*

En gran parte de las aplicaciones, las funciones que desempeñan los atomizadores no son solo desintegrar el fluido en gotas de pequeño tamaño, si no descargar las gotas generadas sobre el aire cumpliendo ciertas condiciones de simetría y uniformidad.

Como se ha explicado previamente en el apartado 3.3.1., los atomizadores tipo *pressure-swirl* pueden generar dos tipos de *spray*, el primero y menos común es el sólido y el segundo y más usado el hueco. En ambos casos las gotas llevan la misma dirección que lleva el flujo antes de desintegrarse, hasta que por la resistencia del aire las gotas que están en la parte más externa del *spray* van perdiendo su momento tal que se detienen formando una neblina de pequeñas gotas, tras esto estas gotas detenidas se mueven según la gravedad.

Los *sprays* de los atomizadores de tipo *pressure-swirl* son bastante dependientes de la geometría del atomizador en lo que a la distribución de gotas se refiere, ya que el ángulo que forma la lámina inicialmente depende en gran parte de la geometría interna de la aguja, sus condiciones de trabajo y las propiedades del líquido, por lo que al aumentar el ángulo de salida aumentará, generalmente, la exposición al aire que ha sido descrita previamente.

Algunas de las principales propiedades que presentan los *sprays* y que pueden ser de interés son las mostradas a continuación.

Dispersión

A la dispersión es posible dar valor cuantitativo para un instante conocido, siempre que se conozca el volumen de líquido. Se puede dar la siguiente definición para el grado de dispersión, relación de volumen del *spray* con el volumen de líquido contenido en él [2], se puede definir pues, como cuan disgregado está el líquido del *spray*.

Una buena dispersión del *spray* ayuda a que se mezclen el aire y el líquido y por lo tanto ayuda a que la evaporación sea más rápida y efectiva. En el caso de los atomizadores *pressure-swirl* está controlada por otras características del *spray*, algunas de estas son, el ángulo de cono, el tamaño medio de gotas y la distribución de las gotas.

Penetración

Se define penetración como la distancia máxima que alcanza el *spray* cuando se inyecta en aire estancado, aunque también se puede definir como distancia máxima que alcanza al inyectarse en aire con flujo cruzado, esto varía en función del medio en el que se inyecte el combustible [2].

La magnitud de esta característica está principalmente controlada por dos fuerzas, una perteneciente al líquido y otra al aire que lo rodea, siendo la primera la energía cinética a la salida del atomizador que lleva el líquido y la segunda la resistencia aerodinámica que presente

el aire circundante al líquido. Pese a que a la salida del atomizador la velocidad sea muy alta, el aumento en la superficie del *spray*, en adición a la disminución progresiva de la energía cinética, provoca que la trayectoria de las gotas en última instancia este gobernada por la gravedad o por la fuerza que ejerce el movimiento de los gases, si es suficientemente grande.

Como se puede intuir, a mayor es el ángulo de salida en un atomizador menor será la penetración del *spray* ya que habrá mayor superficie de contacto entre el aire y el líquido y por lo tanto perderá más energía cinética.

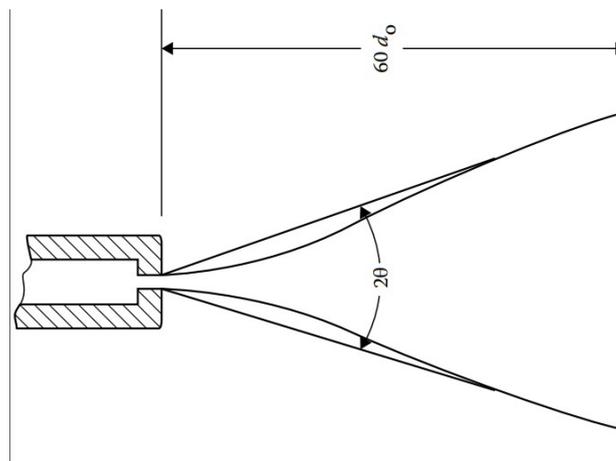


Figura 3.8: Ejemplo definición ángulo y penetración de cono en inyector diésel [2].

Ángulo de cono

Debido a que la lámina que se crea en los atomizadores de tipo *pressure-swirl* se curva, la definición y la medición del ángulo de cono es bastante complicada, generalmente está definida por dos líneas rectas que definen el contorno del *spray* desde la salida del atomizador hasta una distancia específica del atomizador. Pese a lo complicado de la definición del ángulo de cono, este es muy importante para conocer el comportamiento exterior del *spray*, debido a esto se han desarrollado algunos protocolos estándares para su medición, esto supone que la aportar cualquier medición hecha del ángulo de cono hay que aportar una descripción detallada de cuál ha sido el método que se ha utilizado.

Patrón

La simetría que tiene el patrón que presenta el *spray* es una característica bastante práctica en diversas aplicaciones, ya que si el *spray* no es simétrico en aplicaciones relacionadas a la combustión no permite una correcta mezcla aire y gas. Si la falta de simetría no es muy grande no se puede detectar fácilmente a simple vista por lo que es necesario el desarrollo de métodos específicos de control para cada aplicación. El patrón se caracteriza de manera radial y circunferencial. Para cada una de las maneras de caracterizar el patrón hay métodos experimentales distintos.

Distribución de Gotas

Una manera de englobar algunos de los efectos de las características que se han mencionado en los apartados anteriores es lo que se conoce como distribución de las gotas. Para el estudio de las misma se busca obtener lo que se conoce como función densidad probabilística, o *probability density function*, PDF, como se conocen en inglés. En las PDFs se presenta la probabilidad de que haya una gota en a una distancia específica del orificio de salida, también se puede hacer para un rango de tamaños de gotas, así como presentar varios tamaños en una sola gráfica comparativa. Estas gráficas son bastante interesantes y aportan importante información ya que pueden mostrar por una parte cual sería la penetración del flujo, así como mostrar donde se encuentran la mayoría de gotas. La manera de representar estas funciones es bastante variada y varía en gran medida en función de lo que se quiera mostrar. Se muestra un ejemplo de estas funciones en la figura 3.9. En la realización del trabajo se utilizan estas PDFs para ver cómo afecta la variación del número de Weber a las características de la población de gotas generadas.

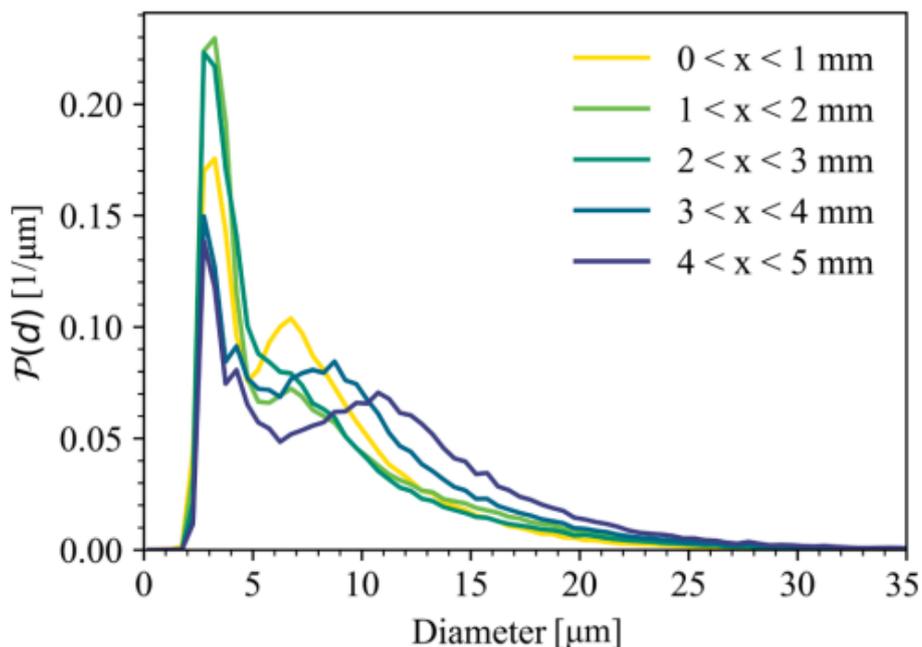


Figura 3.9: Ejemplo PDF de que muestra la probabilidad de encontrar gotas, en función de su diámetro, a diferentes distancias del orificio de salida. [3] [2].

Herramientas utilizadas. CFD y software Basilisk

En la realización de este proyecto se han usado diversas herramientas informáticas, la utilidad de estas ha sido realizar el preprocesado de los datos, el cálculo de las soluciones y el postproceso. Todos los softwares que se han usado en este proyecto son de uso de libre. Para el procesado de datos, en preproceso y postproceso, se ha usado *Spyder*, que es un software de programación libre que usa el lenguaje *Python*, que permite hacer cálculos complejos y la generación de las PDF's mencionadas en el apartado 3.5[9]. Para el cálculo del flujo que se necesita para caracterizar las gotas que se generan se utiliza un software conocido como *Basilisk* que pertenece al grupo de herramientas informáticas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) o dinámica de fluidos computacional. Los cálculos realizados por CFD son los más característicos para realizar las simulaciones de fluidos, de ahí que se vaya a explorar más en profundo en las próximas secciones.

4.1. CFD

4.1.1. ¿Qué es el CFD?

CFD o dinámica de fluidos computacional es el análisis de sistemas que envuelven el flujo de fluidos, la transmisión de calor y los fenómenos asociados, entre lo que se destacan las reacciones químicas, mediante el uso de simulaciones basadas en la computación.

En los últimos años el desarrollo del CFD ha sido para equipararlo en capacidad de cálculo a otras herramientas de cálculo, tales como las de resistencia de estructuras, ya que debido a la complejidad de los cálculos del flujo ha provocado que el desarrollo de estas herramientas se vea rezagada en comparación al de otras.

Actualmente el CFD se emplea en múltiples ámbitos de utilización, algunos de estos ámbitos son los siguientes:

- Cálculo aerodinámico para aeronaves y otros vehículos.
- Hidrodinámica para barcos y otras naves acuáticas.

- Análisis de combustión y proceso de que se dan dentro de motor de combustión interna.
- Análisis de flujo interna dentro de turbo máquinas.
- Investigar procesos en reacciones químicas y como se desarrollan los productos de las reacciones.
- Estudio de la distribución de contaminantes y partículas.

Teniendo en cuenta que hay una gran variedad de programas de código libre de CFD que permiten realizar todo tipo de cálculos, el coste de realizar estos cálculos depende por una parte del tiempo invertido por parte de un operario para programar la simulación, así como el tiempo invertido en el cálculo, ya que en muchos casos es necesario el uso de computadoras de gran potencia de cálculo.[4].

No obstante a lo previamente comentado, el uso del CFD presenta ventajas respecto al uso de métodos únicamente experimentales, entre las que se destacan:

- Reducción en gran medida de tiempos de diseño y los costes de nuevos diseños.
- Posibilidad de estudio de sistemas donde su control en experimentos sea dificultoso o imposible.
- Posibilidad de estudiar un fenómeno en condiciones aleatorios.
- Cálculo virtualmente sin límite en detalle del resultado.

En oposición a estas ventajas el uso de CFD conlleva algunas desventajas:

- Necesidad de gran inversión en *hardware* y *software*.
- Necesidad de personal especializado en tanto en el ámbito de estudio, así como en programación.

4.1.2. Funcionamiento

Los códigos de CFD se estructura en función de algoritmos numéricos. Todos los códigos que se pueden encontrar tienen tres elementos principales que facilitan la organización [4]:

- Preprocesamiento
- *Solver*
- Postprocesamiento

preprocesamiento: Se trata de la introducción de los datos de los problemas de flujo propiamente dicho, se establecen datos desde los que parte el problema y se transforman para que el *Solver* los procese. Dentro de este se establece la geometría, llamada **dominio**, se genera la **mall**a, que se trata de la división del dominio en pequeños dominios que no se

solapen creando lo que se conoce como celdas, y se disponen las propiedades físicas y químicas que se quieren simular, las **propiedades de los fluidos** que van a ser estudiados y las condiciones de contorno, aquellas condiciones que limitan el dominio.

Solver: Se refiere al algoritmo numérico que calcula la solución al problema introducido en el preproceso, existen diferentes técnicas de para hacer los cálculos, pero en general se pueden distinguir tres pasos, integración de las ecuaciones alrededor de todo el volumen de control, discretización, y solución de las ecuaciones que se generan durante la discretización.

Postproceso: Se trata del procesado de las soluciones generadas por el *Solver* para que sean accesibles de manera cómoda por el usuario, ya sea para analizarlas o utilizarlos a futuro para otras simulaciones o visualizarlos mediante softwares de visualización. Algunos ejemplos de visualización de resultados son:

- Geometría del dominio y la disposición de la malla, esto puede ser interesante antes de lanzar una solución, para comprobar que es tal y como queremos.
- Gráficos vectoriales de los parámetros de estudio.
- Gráficos 2D y 3D de las superficies.
- Salida de los gráficos organizados por colores.

4.1.3. Ecuaciones del fluido

Las ecuaciones que se integra el *Solver* sobre el volumen de control son las ecuaciones principales de los fluidos y que son las de ecuaciones de conservación. Estas ecuaciones son las siguientes:

- Masa de fluido.
- Segunda ley de Newton.
- Primera ley de la termodinámica.

El fluido se considera de un continuo y para escalas macroscópicas, igual o mayores a $1 \mu\text{m}$, no se tiene en cuenta la estructura de la materia y los movimientos molecular. Debido a esto se describe el comportamiento del fluido en términos macroscópicos. Se considerará una partícula o punto del fluido como el elemento más pequeño cuyas propiedades macroscópicas no se ven afectadas por moléculas individuales.

La manera en que se define una partícula es considerar un volumen de lados, δx , δy y δz . Como se puede ver en la figura 4.1 los lados generan unas caras la cuales se nombre N, S, E, W, T y B, que se nombran así como norte, sur, este, oeste, arriba y abajo en inglés. En la figura 4.1 se observa también las direcciones positivas y las coordenadas del centro de la partícula (x,y,z) . El estudio sistemático de los cambios en masa, momento y energía del fluido que atraviesa sus límites, las caras del volumen, proporcionan las ecuaciones de

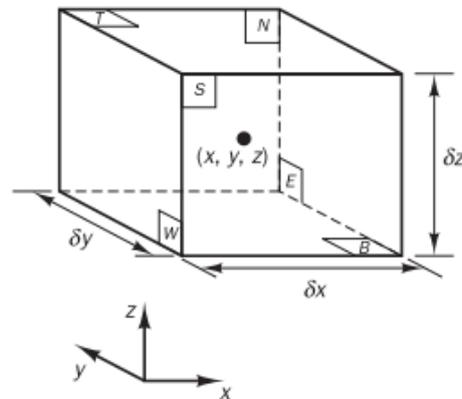


Figura 4.1: Volumen mínimo, partícula de fluido [4].

conservación del fluido.

Todas las propiedades de los fluidos son funciones del espacio y el tiempo, por lo que $\rho(x,y,z,t)$, $p(x,y,z,t)$, $T(x,y,z,t)$ y $u(x,y,z,t)$, para los vectores de densidad, presión, temperatura y velocidad respectivamente. A partir de ahora las anteriores magnitudes se escribirán sin las coordenadas para facilitar la lectura.

Ecuación de conservación de la masa

La ecuación de la continuidad, o de conservación de la masa expresa la imposibilidad de crear o destruir masa y por lo tanto su conservación a lo largo del tiempo.

$$\frac{\delta\rho}{\delta t} + \vec{\nabla}(\vec{\rho}u_j) = 0 \quad (4.1)$$

Si se busca el estudio de un volumen y no de una partícula en concreto se integra la ecuación anterior obteniendo:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho dV + \int_{S_c} \rho(\vec{u}_s - \vec{u}_e) \vec{n} dS = 0 \quad (4.2)$$

para cual:

- $\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho dV$: Indica la variación de masa dentro del volumen de control.
- $\int_{S_c} \rho(\vec{u}_s - \vec{u}_e) \vec{n} dS$: Indica el flujo neto, lo que entra o sale, a través de la superficie de control.

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

Con esta ecuación se expresa la segunda ley de Newton. Esta ecuación indica que el sumatorio de las fuerzas aplicadas sobre un fluido modifica su movimiento, acelerando, decelerando o

frenando dicho fluido.

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\frac{dp}{dx} + \vec{\nabla}\tau + \rho \vec{f}_m \quad (4.3)$$

Los términos de la izquierda hacen referencia a la variación de movimiento mientras que el término de la derecha hace referencia a las fuerzas que afectan al fluido. Integrando la ecuación se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho \vec{u} dV + \int_{S_c} \rho \vec{u} (\vec{u} - \vec{u}_c) \vec{n} dS = \int_{S_c} \tau \vec{n} dS + \int_{V_c} \rho \vec{f}_m dV \quad (4.4)$$

donde:

- $\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho \vec{u} dV$: Indica el cambio de cantidad de movimiento dentro del volumen de control.
- $\int_{S_c} \rho \vec{u} (\vec{u} - \vec{u}_c) \vec{n} dS$: Indica el intercambio neto de materia con el exterior por las superficies de control.
- $\int_{S_c} \tau \vec{n} dS$: Fuerzas superficiales
- $\int_{V_c} \rho \vec{f}_m dV$: fuerzas relacionadas a la masa.

Ecuación de conservación de la energía

Con esta ecuación se muestra que la cantidad de energía de un sistema aislado no puede aumentar ni disminuir, puede eso sí transformarse en un tipo distinto de energía. Esta ecuación tiene en cuenta la energía contenida en el sistema y la energía que entra y sale por las superficies del volumen.

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \vec{\nabla} \dot{u}(\rho h \vec{u}) = -p \vec{\nabla} \vec{u} + \vec{\nabla}(\sigma \dot{u} \vec{u}) + \vec{\nabla}(k \nabla(T)) + \rho \vec{f}_m \vec{u} + Q \quad (4.5)$$

El término de la izquierda representa la energía interna y su variación, mientras que los de la derecha muestran las diferentes maneras de aportar energía al sistema o que el sistema ceda energía, mostrando en los dos primeros el trabajo ejercido sobre las superficies por unidad de tiempo, el tercero el calor intercambiado a través de la superficie por conducción, el cuarto representa el trabajo de las fuerzas másicas y el último el calor intercambiado por radiación y reacciones químicas.

Estas tres ecuaciones son las mismas para todos los casos de estudio de fluidos. Las condiciones y los parámetros que se imponen al sistema cuando se realiza el estudio son las que simplifican y particularizan las ecuaciones para cada caso. La complejidad de las ecuaciones imposibilita la solución analítica, exceptuando casos muy básicos, esto provoca que se solucionen mediante el uso de técnicas numéricas, aplicadas mediante computación.

Pese a esto, las limitaciones que aun presentan los superordenadores hacen que para aquellos casos en que se hayan realizado simplificaciones y con estas se hayan obtenido soluciones correctas, no se use el CFD. Las simulaciones de elemento de gran tamaño, por ejemplo, naves industriales enteras, así como de periodos de tiempo largos, no se pueden simular en su totalidad, provocando que se simulen únicamente algunas partes, por separado, del sistema [4].

4.1.4. Discretización

El uso de ordenadores para resolver las ecuaciones que de los fluidos obliga a que estas sean de tipo algebraico y por lo tanto hay que convertir las ecuaciones diferenciales antes planteadas (4.1, 4.2 y 4.5) en algebraicas. Esta conversión de ecuaciones diferenciales en algebraicas se conoce como discretización numérica, las maneras de discretización más utilizadas son, diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Para este proyecto se va explicar brevemente el método de volúmenes finitos ya que el *software* utilizado principalmente usa el método de volúmenes finitos.

Método de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos se basa en convertir las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo mediante la integración de las mismas para un volumen de control, los cuales son volúmenes finitos.

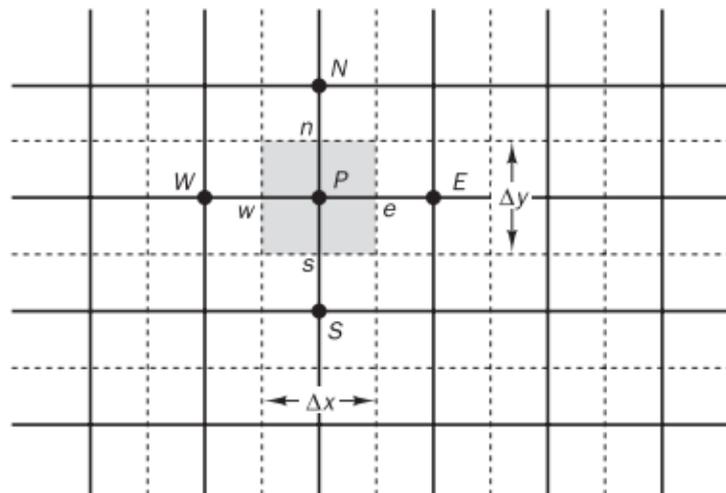


Figura 4.2: Malla 2D o subdivisión de volumen de métodos finitos [4].

Como se ve para simplificar, el volumen se subdivide en x e y para generar volúmenes finitos y definidos. Como se puede observar en la figura 4.2 se puede observar una celda o volumen con el punto central P, que es el que se quiere obtener como análogo a la solución de la

ecuación diferencial. El resto de puntos marcados, E, N, S y W, son los puntos equivalentes a P en las celdas colindantes y las paredes o límites e, n, s y w son las superficies que limitan el volumen finito donde se encuentra el punto P.

Para explicar cómo se realiza el cálculo de la derivada en P para una magnitud se va explicar para un caso con una sola dimensión para mayor facilidad:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (4.6)$$

Pues para obtener los valores del punto P se hace en función de los datos de las superficies adyacentes:

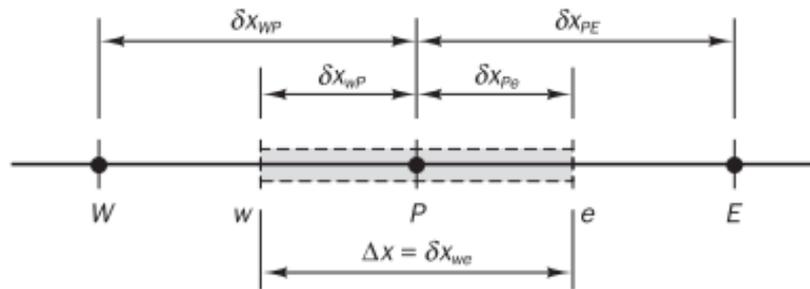


Figura 4.3: Ejemplo discretización elemento unidimensional [4].

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right)_P = \frac{\frac{\partial^2 U}{\partial x_e^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x_w^2}}{x_e + x_w} \quad (4.7)$$

Esta por su parte se obtienen por los datos de los puntos adyacentes a la superficie tal que:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x_e^2} = \frac{U_E - U_P}{x_E - x_P} \quad (4.8)$$

Gracias a estos términos se pueden implementar en cualquier celda para encontrar el análogo numérico de las derivadas de para cada volumen, de esta manera e implementando unas condiciones de partida se puede resolver el sistema de ecuaciones que se genera.

4.1.5. Cómo solucionar de las ecuaciones discretizadas

Una vez discretizadas las ecuaciones, se consigue un sistema de ecuaciones algebraicas que se pueden escribir de manera matricial esquemática como:

$$Ax = b \quad (4.9)$$

Siendo A los coeficientes y b los términos independientes.

La complejidad y el tamaño de estos sistemas de ecuaciones dependen de las dimensiones del problema, el número de celdas o nodos que tenga la malla y la discretización hecha. Aunque se pueda usar cualquier método de cálculo para resolver el sistema la potencia de cálculo informático disponible es lo que limita el método usado en gran medida.

Dentro de esos métodos se pueden englobar dos familias o grupos de métodos, siendo estos:

- Métodos Directos.
- Métodos indirectos o iterativos.

Los **métodos directos** son aquellos que basan la resolución de las ecuaciones mediante métodos como el de la regla de la matriz inversa de Cramer y la eliminación gaussiana. En estas se puede previamente saber el orden de cuantas operaciones se van a realizar, siendo en un sistema de N ecuaciones con N incógnitas, el orden de operaciones a realizar es N^3 .

Los **métodos indirectos o iterativos** como su propio nombre indica se basan en la aplicación de algoritmos relativamente simples hasta alcanzar una convergencia tras un número de repeticiones. Algunos de los ejemplos más utilizadas son el de Jacobi y el de Gauss-Seidel. En estos métodos no se puede predecir el número de operaciones que se van a realizar y tampoco se puede asegurar la convergencia de la solución si no se cumplen ciertas condiciones. Su principal ventaja es que solo los coeficientes que no sean 0 son necesarios que se almacenen [4].

El método de volúmenes finitos genera un gran número de ceros normalmente. Debido a lo antes mencionado y que los sistemas generados de problemas de CFD realistas generan un gran número de ecuaciones, de 100.000 hasta 1 millón de ecuaciones, los métodos iterativos son en su mayoría más económicos que los directos. Planteando un sistema de ecuaciones como este:

$$\begin{aligned}2x_1 + x_2 + x_3 &= 7 \\ -x_1 + 3x_2 - x_3 &= 2 \\ x_1 - x_2 + 2x_3 &= 5\end{aligned}\tag{4.10}$$

Se aísla cada una de las en cada ecuación una de las incógnitas: n sistema de ecuaciones como este:

$$\begin{aligned}x_1 &= (7 - x_2 - x_3)/2 \\ x_2 &= (2 + x_1 + x_3)/3 \\ x_3 &= (5 - x_1 + x_2)/2\end{aligned}\tag{4.11}$$

Se comienza dando valores supuestos a las diversas incógnitas y cambiando el resto hasta que se llega a una solución. Tras esto se pasa al siguiente instante temporal.

4.1.6. Modelos de turbulencia

Todos los flujos que se encuentran en la práctica de la ingeniería, tanto los más simples, como flujo en tuberías o chorros de dimensiones, como los más complejos tridimensionales, se

vuelven inestables, y por lo tanto turbulentos al alcanzar cierto número de Reynolds, siendo un flujo turbulento aquel que tiene un estado caótico y aleatorio del movimiento, cambiando continuamente la velocidad y la presión a lo largo del tiempo.

La turbulencia que aparecen en los flujos, causa que se generen los remolinos de gran variedad de rangos y escalas temporales, que interactúan de manera compleja y dinámica. La importancia de la turbulencia en el estudio de flujos ha provocado el desarrollo de diferentes métodos numéricos. Estos métodos se clasifican en tres categorías:

- **Modelos de turbulencia de Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS):** En estos modelos se pone el foco en el promedio del flujo y por lo tanto el efecto en el flujo promedio de la turbulencia. Previamente a la aplicación de los métodos de Navier-Stokes las ecuaciones son promediadas en el tiempo. Las exigencias computacionales necesarias para este tipo de modelos no son muy elevadas por lo que han sido los más usados en las últimas décadas.
- **Large eddy simulation (LES):** Se trata de una forma de cálculo intermedio de turbulencia, estudiando la evolución de remolinos de gran tamaño. El método incluye el filtrado de las ecuaciones inestables de Navier-Stokes previamente a la computación, de tal manera que los remolinos más pequeños no son calculados mientras que los de mayor tamaño sí que lo son. Estos modelos son interesantes, pese al aumento del volumen de almacenaje y cálculo en comparación a los modelos de RANS, ya que sirve como aproximación a problemas de geometría más compleja.
- **Direct numerical simulation (DNS):** Estas simulaciones, calculan el flujo medio a la vez que calculan todas las variaciones turbulentas de velocidad. Las ecuaciones de Navier-Stokes inestables son calculadas mediante una malla espacial suficientemente fina. Este método solo se suele usar en investigación debido al alto coste en computación que supone.

4.1.6.1. Tratamiento de pared

Debido a que las paredes en cualquier caso son críticas debido a la alta vorticidad que se generan en las mismas tienen que recibir un tratamiento diferente. Este tratamiento se basa en utilizar lo que se conoce como "capa límite".

La capa límite^{es} una fina capa situada cerca de las paredes, donde los esfuerzos viscosos igualan en magnitud a las fuerzas inerciales, a causa de esto, no pueden ser despreciados en la resolución de las ecuaciones de cantidad de movimiento. Para este problema se define la distancia normal a la pared, y^+ , en función de la disposición geométrica del mallado, el valor y^+ indica la distancia perpendicular a la pared del centroide de la primera celda continua a la pared, a la misma. y^+ viene definido en la siguiente ecuación: [5]

$$y^+ = \frac{y \dot{u}_t}{\nu} \quad (4.12)$$

- y : distancia normal a la pared.
- u_t : Velocidad de fricción, que se calcula como $\sqrt{\tau_w/\rho}$, siendo ρ la densidad y τ_w los esfuerzos cortantes.
- ν : viscosidad cinemática del fluido.

En función del valor de y^+ se pueden distinguir tres zonas de la capa límite y depende de en qué zona este cada la capa límite tendrá distintas características:

- Subcapa viscosa: Zona donde $y^+ < 5$ y donde se establece una relación lineal, y actúa la **ley de pared** definida en la siguiente ecuación:

$$u^+ = y^+ \rightarrow \frac{\bar{u}}{u_\tau} = \frac{y \dot{u} u_t}{\nu} \quad (4.13)$$

- Capa buffer: capa de transición entre la subcapa viscosa y el flujo alejado de la pared. Esta capa se da en $5 < y^+ < 30$, el flujo en esta capa es inestable y poco modelable por lo que no se recomienda que la capa pegada a la pared este dentro de este rango.
- Capa logarítmica: Es la capa más alejada de la pared y se encuentra a partir de $y^+ > 30$.

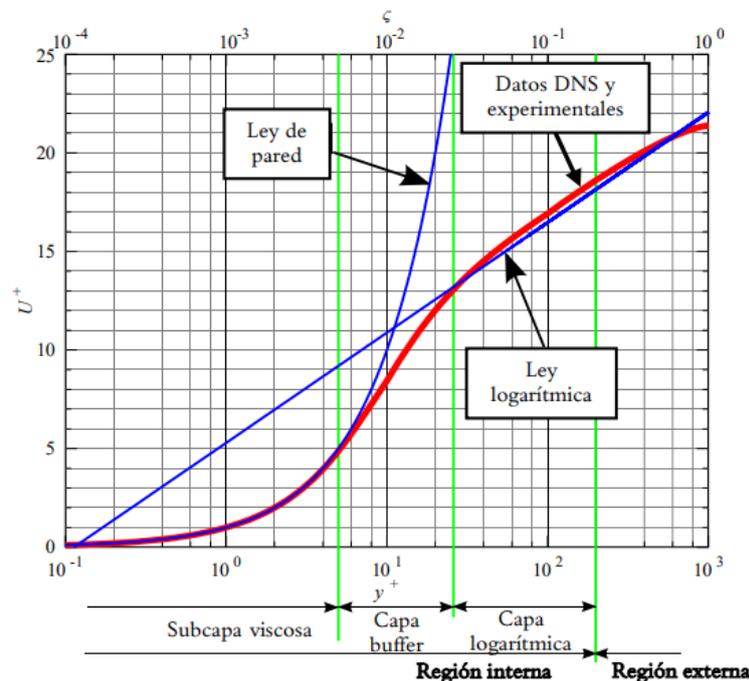


Figura 4.4: Gráfica, zonas y^+ [5]

En la figura 4.4 se observa lo antes comentado, para $y^+ < 5$ la ley de pared es la que se acopla a la realidad, para la $y^+ > 30$ se acopla mejor y para los valores intermedio no se llega acoplar ninguna de las soluciones.

Los *softwares* de CFD pueden tener dos enfoques distintos, por un lado se puede optar por modificar la resolución de la capa límite para que esta se encuentre dentro de la subcapa viscosa, esto hace aumentar el número de celdas en gran medida cerca de la pared, y por lo tanto aumenta el coste de computación.

El otro enfoque es el uso de técnicas semiempíricas o el uso de DNS ya que estos resuelven todos los niveles de turbulencia.

4.1.7. Direct numerical simulation, DNS

En este proyecto el método utilizado de cálculo es el conocido como DNS, debido a esto se explicará más a fondo cómo funciona este modelo de turbulencia.

Para este modelo las ecuaciones de continuidad instantánea y las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo turbulento genera un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas, el modelo DNS usa estas ecuaciones como punto de partida para generar una solución con una malla lo suficientemente pequeña y con saltos temporales lo suficientemente pequeños como para resolver los torbellinos más pequeños y los cambios más rápidos.

Los principales beneficios del modelo DNS son los siguientes [4]:

- Detalles precisos de los parámetros de las turbulencias y su transporte en cualquier punto del volumen de control, permitiendo crear y validar modelos de turbulencia nuevos de manera más económica.
- Se pueden generar resultados que no se podrían medir con experimentos convencionales y además se pueden probar estructuras teóricas de turbulencias.
- Se pueden también evaluar y probar técnicas experimentales avanzadas y calibrar algunos aparatos de medida.
- Se puede investigar turbulencias fundamentales que no se podrían dar en experimentos de la realidad incluyendo o excluyendo aspectos concretos de los flujos físicos.

En oposición a los múltiples beneficios que se obtienen de los DNSs como principal desventaja se encuentra la gran complejidad de la solución directa de las ecuaciones del flujo debido al gran rango de tamaños y escalas temporales debido a la aparición de remolinos en los flujos turbulentos. Para la resolución de todos los tamaños de turbulencias que aparecen con un número de Reynolds pequeños de 10^4 requerirá una malla de aproximadamente 10^9 celdas, siendo el orden generalmente de $Re^{9/4}$ celdas. Además, en el caso de las escalas temporales se calcula que el número de *time steps* es igual a $Re^{1/2}$, siendo para un Re de 10^4 necesario 100 *time steps*, no obstante, en la práctica, se suelen usar un número de *steps* mayores para asegurar la obtención de estadísticas más fiables.

Problemas Numéricos

Debido a que esta sección se realiza una breve introducción al CFD y dentro del mismo al DNS no se va indagar en los detalles del funcionamiento de los métodos usados en DNS, no obstante en este apartado se va a hacer un resumen de las especificaciones específicas para DNS.

- **Discretización Espacial**, actualmente se usan varios métodos de discretización espacial, algunos de estos son los métodos de **elementos espectrales**, donde se aprovecha la flexibilidad geométrica del método de elementos finitos con la convergencia de del método espectral, y los métodos de **diferencias finitas de orden superior**, siendo estos segundo los más usados a día de hoy para geometrías complejas, aunque estos hay que prestar bastante atención a que el método sea estable para evitar que se disipen algunos torbellinos turbulentos.
- **Discretización Temporal**, como se menciona antes, hay un rango muy grande de escalas temporales. Los saltos temporales grandes que se usan generalmente en sistemas de CFD no son útiles para DNS, esto se debe a que se necesita una gran resolución para caracterizar todas las variaciones y la disipación de energía a lo largo del tiempo. Se ha de ajustar los steps tal que una partícula no recorra más de una celda por step temporal para conseguir la resolución deseada.

4.2. Basilisk

Para la realización de las simulaciones que se realizan en este trabajo se ha seleccionado el *software* llamado Basilisk. Basilisk se trata de un *software* libre, es decir es gratuito. Este es útil para hacer cálculos de complejos de fluidos, ya sean problemas de flujo externo o interno, combustión o transferencia de calor, por lo que lo hace una muy buena opción frente a programas de pago y que tienen prestaciones similares.

El código que usa Basilisk se basa en el lenguaje C++, los códigos de Basilisk se escriben sobre archivos de texto los que se computaran después con *software* desde la terminal del ordenador. El lenguaje que usa Basilisk es más compacto que el C++ ya que tiene librerías propias para trabajar cada caso, además reservar algunas palabras para algunas variables.

A parte de los paquetes incluidos en Basilisk, se usan otros paquetes y programas para el postproceso y preproceso de los datos, como *Python* y *ParaView*.

4.2.1. Estructura general código Basilisk

Para describir cómo funciona un script o código se coge un ejemplo de script de los usados para la realización de los cálculos en este trabajo. Antes de eso, como y se ha dicho, hay ciertas palabras para algunas variables, siendo estas:

- $u\ v\ w \rightarrow$ componentes de la velocidad
- $p \rightarrow$ presión
- $t \rightarrow$ tiempo
- $N \rightarrow$ tamaño de malla
- $L0 \rightarrow$ tamaño físico

Al principio del código se establecen las librerías que se van a utilizar, para ello se utiliza el comando `#include` y después se pone el nombre de la librería que se vaya a utilizar, en la figura 4.5 se ven distintas librerías que se incluyen.

```
#include "navier-stokes/centered.h"  
#include "two-phase.h"  
#include "tension.h"  
#include "tag.h"
```

Figura 4.5: Ejemplo código `#include`

Tras esto se usa el comando `# define` para definir las constantes numéricas que se vayan

```
#define radius 1./12.
#define length 0.025
#define Re 5800
#define SIGMA 3e-5
```

Figura 4.6: Ejemplo código #define

a utilizar, se ve un ejemplo en la figura 4.6

A continuación, se define las condiciones de contorno del volumen de control. En la figura 4.7 se establece las distribuciones de los componentes de la velocidad, de la presión y de la fracción volumétrica de fluido, indicando que entre corchetes a qué lado del volumen pertenece.

```
scalar f0[];
u.n[left] = dirichlet(f0[]*(1. + 0.05*sin (10.*2.*pi*t)));
u.t[left] = dirichlet(0);
#if dimension > 2
u.r[left] = dirichlet(0);
#endif
p[left] = neumann(0);
f[left] = f0[];

u.n[right] = neumann(0);
p[right] = dirichlet(0);
```

Figura 4.7: Ejemplo código condiciones de contorno

En la siguiente parte del código se establece la función principal del código, introduciendo las características de los fluidos y de la malla original.

```
int main (int argc, char * argv[])
{
    if (argc > 1)
        maxlevel = atoi (argv[1]);
    if (argc > 2)
        uemax = atof (argv[2]);
    init_grid (64);
    origin (0, -1.5, -1.5);
    size (3.);
    rho1 = 1., rho2 = 1./27.84;
    mu1 = 2.*radius/Re*rho1, mu2 = 2.*radius/Re*rho2;
    f.sigma = SIGMA;

    run();
}
```

Figura 4.8: Ejemplo código función de lanzamiento

A partir de aquí ya se establecen lo que se llaman eventos, que son funciones que se realizarán una acción en concreto en la simulación, como guardar los datos deseados en un archivo *.txt* como pueden ser el sacar imágenes y guardarlas. Estas funciones siempre comenzarán con *event* y después el nombre de la función.

```
event snapshot (t = 0.1; t += 0.1; t <= 3.8) {
    char name[80];
    sprintf (name, "snapshot-%g", t);
    scalar pid[];
    foreach()
        pid[] = fmod(pid()*(npe() + 37), npe());
    dump (name);
}
```

Figura 4.9: Ejemplo función para obtener capturas de imagen de la simulación.

4.2.2. Softwares adicionales

Durante la realización del trabajo se han utilizado softwares a parte de Basilisk, usando el software de cfd libre de OpenFoam, y software para el preprocesado de los datos para Basilisk y para el postprocesado de los resultados obtenidos.

- **OpenFoam:** OpenFoam es un software libre para la realización de cálculos CFD tanto para estudiantes como para proyectos profesionales, en este proyecto se ha utilizado para obtener los datos a la salida del atomizador mediante la simulación del flujo interno del atomizador.
- **Spyder:** Spyder es un software de programación que usa el lenguaje de programación conocido como *Python*. Este software tiene múltiples aplicaciones, como el desarrollo web, uso educativo y de análisis tratamiento de datos numéricos. En este proyecto se ha usado para el tratamiento de datos numéricos durante el preproceso y el postproceso.
- **Paraview:** Paraview es un software libre de postproceso de datos para simulaciones de cfd. Este se ha usado para sacar imágenes y datos para comprobar de manera visual el que las simulaciones transcurren correctamente.

Desarrollo del trabajo

En este capítulo se procederá a explicar cómo se ha desarrollado el trabajo en su integridad, en un primer momento se explicará las características físicas del atomizador estudiado, así como las propiedades físicas de los fluidos que se han simulado. Además, se explicará como se ha planteado las simulaciones y los postprocesos desarrollados.

5.1. Características Físicas

5.1.1. Atomizador

Como se ha comentado en apartados anteriores, el atomizador utilizado es el conocido como atomizador tipo *pressure-swirl*, que se caracteriza por tener unos canales tangenciales por donde se introduce el líquido a lo que se conoce como cámara de *swirl*, con forma cónica y a partir de aquí salen por el orificio de salida.

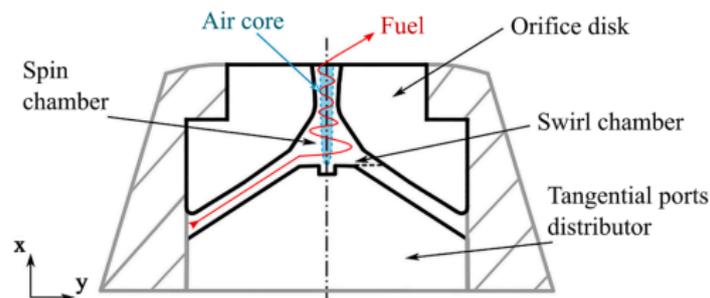


Figura 5.1: Corte lateral atomizador *pressure-swirl*

El atomizador que se ha investigado en el proyecto es el *Danfoss OD-H 030H8103 oil nozzle* comercial, en la figura 5.2 se ven imágenes del modelo del atomizador. Este modelo de atomizador tiene un flujo medio de 1,35 kg/h y el ángulo de dispersión es de 80°. El atomizador posee tres puertos tangenciales por los que entra el combustible. Como se observa en la figura 5.2, el atomizador se compone por varias partes metálicas que forman las cámaras del

interior del atomizador.

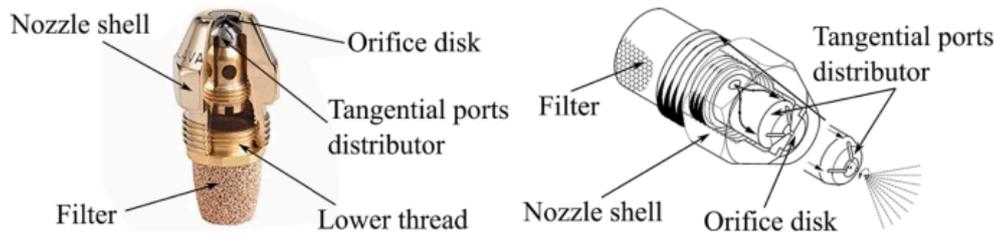


Figura 5.2: Atomizador tipo *pressure swirl* comercial, *Danfoss OD-H 030H8103 oil nozzle*

Los datos geométricos de este modelo de atomizador se han obtenido mediante diversas técnicas para medirlos. Los datos geométricos obtenidos mediante estas técnicas se exponen en la figura 5.3 y la tabla 5.1 .

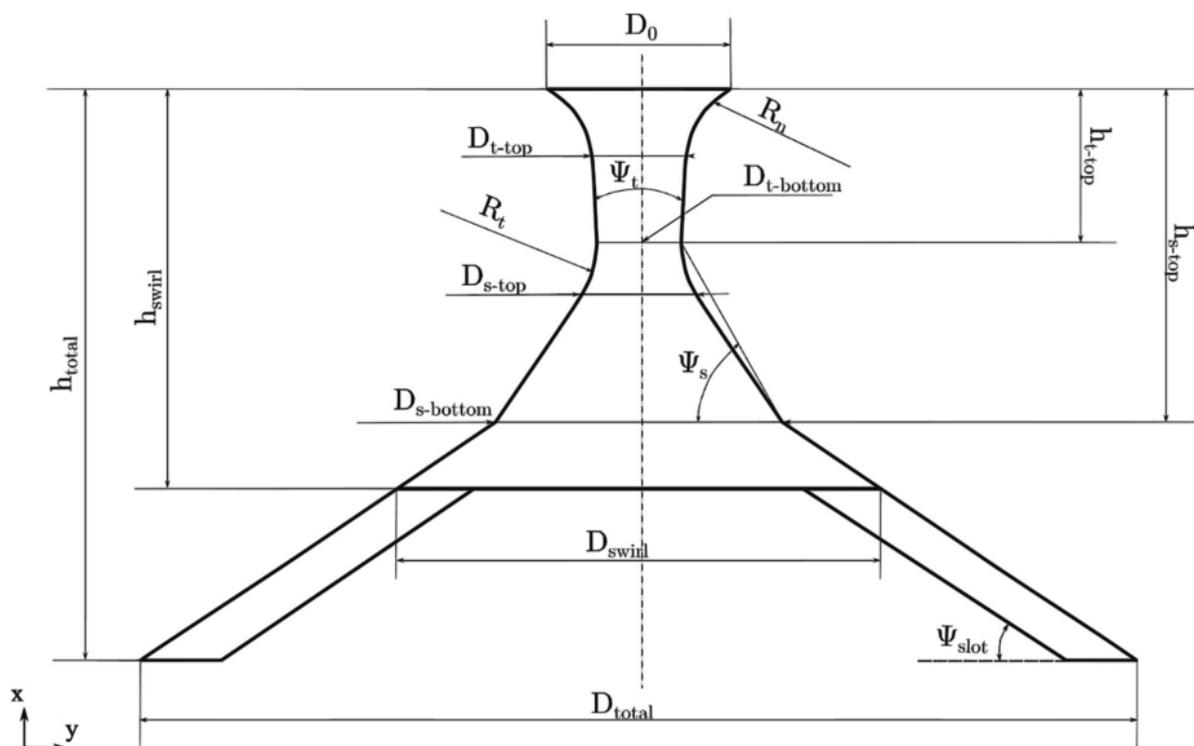


Figura 5.3: Esquema datos geométricos del *atomizador Danfoss OD-H 030H8103 oil nozzle*

Para esta simulación es muy importante el D_0 ya que será la sección por la que se introduce el fluido al volumen de control, por lo que se va a dar este valor, que es de $D_0 = 300\mu\text{m}$.

Parámetro	Unidades	Valor
D_0	μm	300
D_{t-top}	μm	180
$D_{t-bottom}$	μm	165
D_{s-top}	μm	210
$D_{s-bottom}$	μm	500
D_{swirl}	μm	780
D_{total}	μm	3375
h_{t-top}	μm	240
h_{s-top}	μm	540
h_{swirl}	$\mu\text{ m}$	620
h_{total}	$\mu\text{ m}$	2400
R_n	$\mu\text{ m}$	308
R_t	$\mu\text{ m}$	190
ψ_t	$^\circ$	6
ψ_s	$^\circ$	61
ψ_{slot}	$^\circ$	30

Cuadro 5.1: Tabla de datos geométricos del atomizador *atomizador Danfoss OD-H 030H8103 oil nozzle*

5.1.2. Fluidos

Con el fin de estudiar el efecto que tiene el número de Weber en la atomización primaria en los atomizadores tipo pressure-swirl se han planteado dos combustibles a simular, en primer lugar, se ha utilizado el Heptano, el cual es un combustible real y ha sido utilizado como base para obtener el segundo combustible, que es el mismo Heptano, pero aumentando el número de Weber a la entrada de los conductos del atomizador. Como se puede observar en la tabla 5.2 la relación $We_{modificado}/We_{original} \approx 4$ y siendo la relación entre las tensiones superficiales opuesta, $\gamma_{modificado}/\gamma_{original} \approx 1/4$

Propiedades	n-Heptano	pseudo n-Heptano
Densidad [kg/m^3]	681,7	681,7
Viscosidad [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]	3,92e-04	3,92e-04
Tensión superficial [N/m]	0,0197	0,0046
Re en inlets	2149,94	2149,94
We en inlet	474,14	2000,00
kolmogorv	0,9502	0,9502
dx/eta	1,0524	1,0524

Cuadro 5.2: Datos combustibles

5.2. Simulaciones

En este trabajo se han realizado dos tipos de simulación, en primera instancia se han realizado simulaciones tipo RANS y LES del flujo interno del atomizador para obtener datos diversos datos para las siguientes simulaciones, estas segundas simulaciones son de tipo DNS y se usan para caracterizar principalmente el flujo externo y la distribución de gotas a la salida del atomizador.

5.2.1. Flujo interno

Como se ha mencionado con anterioridad, las simulaciones de flujo interno del atomizador son de tipo RANS y LES, con estas simulaciones de menor resolución y de menor precisión de cálculo se busca principalmente obtener los datos del flujo a la salida del atomizador par posteriormente introducirlos como condiciones de contorno para las simulaciones de flujo externo. Pese a que se les llama simulaciones de flujo interno también se simula el flujo externo para observar cuando el flujo termina su transitorio a la salida del atomizador y para cambiar el tipo de simulación y aumentar el refinamiento. Para realizar estas simulaciones se ha utilizado el software abierto conocido como OpenFoam.

5.2.1.1. Geometría, dominio y mallado

La geometría que se ha introducido para realizar la simulación es la geometría del atomizador explicada en el apartado 5.1.1., pero la simulación se ha introducido por partes, añadiendo una parte del exterior, para controlar como se desarrolla el flujo.

El mallado se ha realizado para ambos casos igual ya que lo único que varía entre ambos fluidos son valores asociados al número de Weber y no al número de Reynolds, por lo que no aumenta la turbulencia y no hace más resolución en una que en la otra, el tamaño de la malla, así como el nivel de refinamiento se obtuvo mediante un estudio de sensibilidad de malla previo. El dominio original de la simulación es el de un cubo de tamaño de 3x3x3 mm y de 100x100x100 celdas, en la figura 5.4a se observa el cubo generado en este paso. Tras esto se usa la función *surfaceFeatures* de OpenFoam para que la malla se acople a la geometría del atomizador, en la figura 5.4b se observa cómo queda la malla acoplada a la estructura de los stl. Tras esto se procede a realizar el refinamiento de la malla, este se hace en ciertas zonas en concreto, para hacerlo se toma como referencia las superficies de los .stl sobre los cuales se ha acoplado la malla, en las figuras [5.4d, 5.4c].

5.2.1.2. Condiciones de contorno y de inicio

En OpenFoam se establecen distintas condiciones de contorno para los distintos parámetros de la simulación:

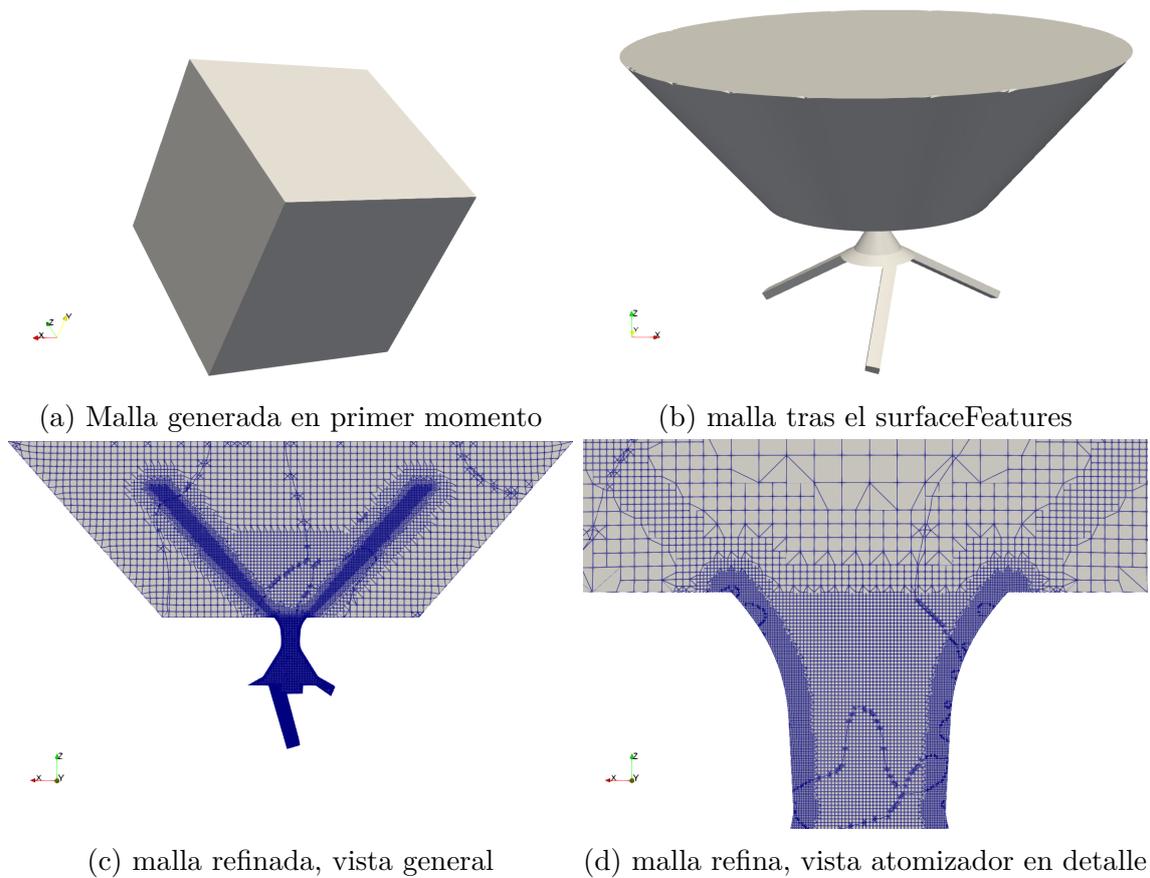


Figura 5.4: Proceso de mallado

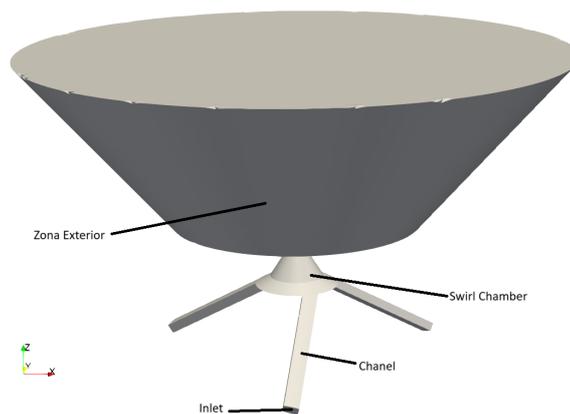


Figura 5.5: Estructura de las partes del atomizador en la simulación.

- **Fracción de volumen:** En este caso se establece que en todas las paredes del atomizador se establece una condición de contorno de *zeroGradient* en el interior del atomizador, esto indica que al inicio de la simulación todo el atomizador estará repleto de fluido, por otro lado, se le introduce una condición de *inletOutlet* a los muros de la

zona exterior, para indicar que sí que puede "salir" fluido de dentro hacia fuera, pero de fuera hacia dentro no puede. Por último, en la parte inferior de los conductos se introduce la condición de *inlet* que indica que entra fluido por esa región.

- **Presión:** Para la presión se ha introducido la misma condición que para la fracción de de volumen en el interior del atomizador, en cambio en el exterior se ha dado una condición inicial de *totalPressure*, que nos indica que la presión total del volumen sea constante.
- **Velocidad:** En este caso se ha introducido en el *inlet* la velocidad de entrada del fluido y la densidad del mismo para establecer el flujo másico del mismo, siendo la velocidad de 0.00027999 m/s. En la parte interior del atomizador se ha introducido la condición de *noSlip*, que fija la velocidad entorno al volumen seleccionado en (0,0,0).

5.2.1.3. Control y mapeado

Durante la simulación de flujo interno se lleva a cabo en primer lugar una simulación RANS y luego LES, esto se hace ya que los datos que se mapean para posteriormente utilizar son los que se generan una vez el *Air core* del atomizador está totalmente desarrollado y estabilizado y no es necesario usar una simulación de tanta resolución como una LES. Durante la primera parte de la simulación se controla mediante la visualización de los resultados en *ParaView* el desarrollo del *Air Core*, hasta que este se estabilice, además también se controla el *y+* para comprobar que en la pared no se alcanzan valores que indiquen que los resultados pueden no ser correctos como se explica en el apartado 4.1.6.1.

Tras la estabilización del *Air Core* en la RANS se cambia la simulación a tipo LES de primer orden, donde otra vez se controla hasta donde se estabilice el *Air Core*, en este momento se cambiará a una LES de segundo orden, donde ya se comenzará a mapear los resultados de para introducirlos en la simulación de flujo externo. En la figura 5.6 , se muestra diferentes puntos de la simulación entre ellos los puntos de la simulación, siendo los puntos a) b) c) pertenecientes a la parte de la simulación hecha en RANS, siendo el c) donde ya se había estabilizado la formación del Air Core, luego el punto d) muestra el punto donde la simulación alcanza el límite del Air Core para la simulación de LES de primer orden, y el la f) donde el Air Core se ha estabilizado totalmente y a partir del cual se recogen los datos para la simulación de tipo DNS.

Los datos obtenidos de la simulación una vez se ha estabilizado el Air Core se guardan en archivos *.raw*, los cuales guardan en un archivo la fracción de volumen en cada celda con las coordenadas de la misma, y en otro archivo los tres componentes de la velocidad en cada celda y al igual que en la fracción volumétrica, las coordenadas de las celdas. Cabe recalcar que únicamente se guardan los datos a la salida del inyector, del orificio de salida. Mediante un programa de *Python* se procesan estos archivos para darles el formato que usa *Basilisk*, además de interpolar valores tanto por la diferencia de malla como por la diferencia entre saltos temporales.

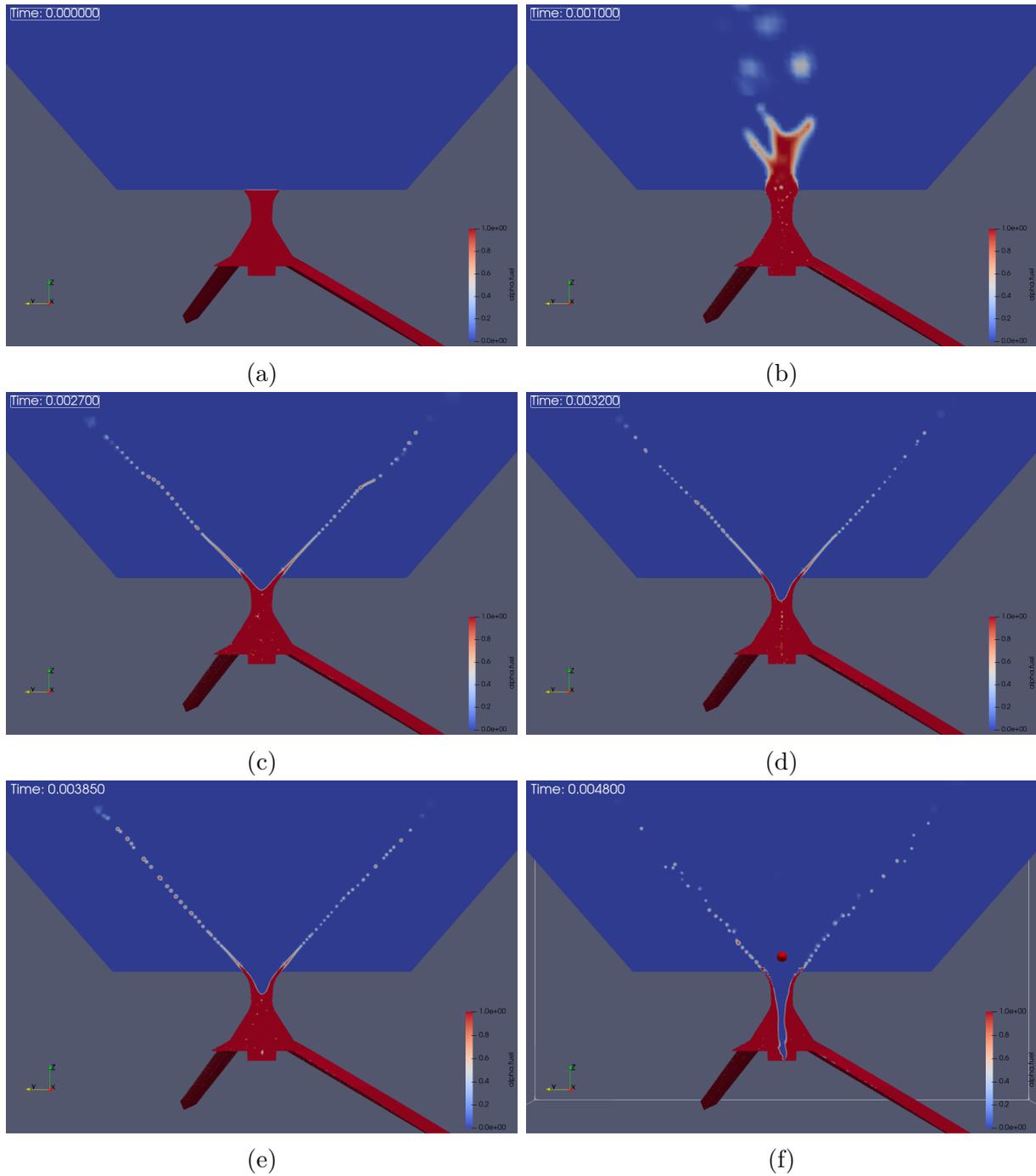


Figura 5.6: Desarrollo diferentes etapas simulaciones de flujo interno.

5.2.2. Flujo Externo

5.2.2.1. Dominio y mado

Basilik puede usar mallas cartesianas adaptativa, por eso se usa los que se llama Adaptive Mesh Refinement (AMR) lo que permite poder resolver con alto detalle problemas con distintas escalas de resolución. Estas mallas no son fijas para cada timestep, sino que varían en cada uno adaptándose en función de parámetros previamente establecidos. En el caso de estudio se ha utilizado como parámetros la diferencia entre celdas de los componentes de velocidad y de la fracción volumétrica de fluido, para esto se ha establecido unos valores umbral que indican la máxima diferencia que puede haber entre celdas, y en cada timestep la malla se refina en diferentes zonas hasta alcanzar los valores umbral en toda la malla, provocando que haya zonas con celdas de mayor tamaño que otras. Para evitar que refine en exceso se impone un nivel máximo de refinamiento en el que dejará de refinar, aunque no haya alcanzado el valor umbral.

Definir el dominio y la malla es fundamental para el gasto computacional necesario y para la resolución conseguida. La malla utilizada es estructura cartesiana de árbol u octree la cual se utiliza ya que permiten realizar la AMR, esta estructura cada vez que aumenta un nivel de resolución divide la celda en 8 celdas [6].

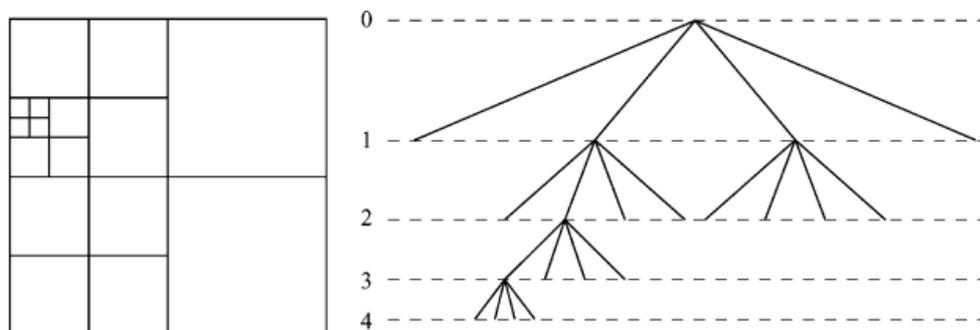
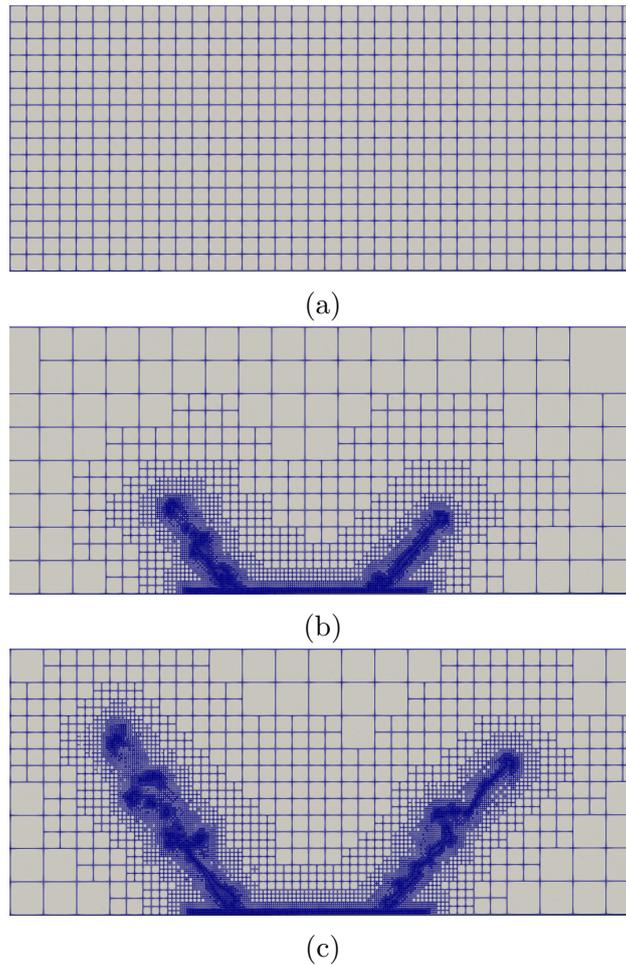


Figura 5.7: Ejemplo estructura de árbol 2D, llamada quadtree al dividir en 4 en vez de 8 [6]

Una vez definida la estructura de la malla lo que sigue es definir el tamaño de celda mínimo, siendo de un $1\mu m$ de lado. Este valor se obtenido mediante la premisa que en DNS se ha de solucionar las todos los niveles de energía hasta la escala de Kolmogorov, debido a esto se ha realizado una aproximación a la misma tal que $\eta \sim LR_{fuel}^{3/4}$, obteniendo que la escala de Kolmogorov $\eta = 0,95\mu m$, por lo que como se ha comentado antes se usa $dx = 1\mu m$ [10]. A parte en más literatura se establece la siguiente relación para la elección de dx , $dex/\mu = 2,1$, en este caso se ha utilizado un tamaño menor debido a que gracias al uso de AMR no se tiene un aumento excesivo del coste de computación al usar un tamaño menor [10],[10]. Para la malla adaptativa se han escogido los siguientes valor umbrales como límites, siendo la variación máxima aceptada para cada componente de la velocidad de $1m/s$ y la variación máxima de fracción $1e-6$. Estos valores han sido escogidos de simulaciones anteriores donde

Figura 5.8: Transformación malla AMR caso *Basilisk*.

se observó que estas permiten obtener una malla lo suficientemente fina en las zonas donde interactúa el fluido con el aire.

Para la elección del dominio se ha tenido en cuenta que este tiene que ser lo suficientemente pequeño para que el número de celdas no aumente de manera excesiva el coste computacional, y por otra parte de ha de ser suficientemente grande como para que el flujo se desarrolle por completo, que permita que se validen los resultados con estudios previos y para tener suficientes datos para obtener estadísticas sobre las gotas generadas en la atomización primaria. Se han comprobado diversos tamaños de dominio hasta que se ha seleccionado un dominio cubico de 8 mm de lado. Este dominio se tiene que aumentar ligeramente, tal que $l_{x,y,z}=8,192$, debido a cómo funciona el refinamiento. En cada nivel de refinamiento se divide en dos cada dirección de la celda, es decir $l_{x,y,z,ref} = l_{x,y,z}/2^{n_{ref}}$, por ejemplo, para un punto que tiene un nivel de refinamiento de 10 las celdas tendrán un lado de $l_{x,y,z}/2^{10} = 8\mu m$, entiendo esto el aumento de tamaño del dominio se debe a que si usamos un dominio de 8mm no se podría conseguir el tamaño mínimo de celda definido, de $1\mu m$, en cambio si el

tamaño es de 8.192 mm con $n_{ref}=13$ se alcanzaría este tamaño de celda, ya que $2^{13} = 8192$. El número de celdas para $t=0$ es de 256^3 , este se ha puesto exclusivamente para inicializar la simulación ya que el AMR refinará las zonas que se necesiten.

5.2.2.2. Condiciones de contorno

En esta sección se va a establecer las condiciones de contorno, así como parámetros previos necesarios para la simulación.

El número de CFL o número de Courant-Friedrichs-Lewy, es menor que uno para asegurar la estabilidad del cálculo, en consecuencia, de tener un valor constante de CFL el dt varia a lo largo de la simulación. Por otra parte, el tiempo de simulación total, se ha establecido para conseguir que haya datos de estacionarios como para poder procesarlos, estableciendo este tiempo en $300 \mu s$ obtenidos de simulaciones previas.

En lo que respecta a las condiciones de contorno se han usado tres tipos de condiciones de contorno, inflow, wall y outflow, estas se pueden observar la siguiente imagen .

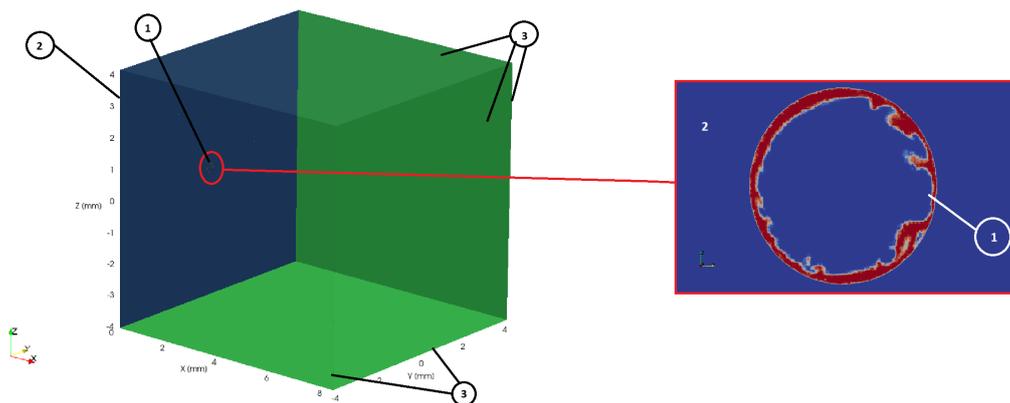


Figura 5.9: Condiciones de contorno: 1)Inflow,2)Wall, 3)Outflow

- Inflow:** Esta condición esta puesta en el orificio de salida del atomizador e introduce valores de velocidad variable $u(t)$ y de la fracción volumétrica de fluido $f(t)$, los cuales se obtienen del procesamiento de datos de simulaciones previas del flujo interno hechas en LES, por otra parte, la presión p se introduce mediante una condición de contorno Neumann, de gradiente cero.
- Wall:** En la cara del cubo donde se encuentra el orificio de salida del atomizador se impone esta condición de contorno que impone una condición de Drichlet de cero para la velocidad y la fracción de volumen ya que ambos parámetros se introducen por el orificio de salida, en cambio la presión tendrá una condición de contorno de Neumann de gradiente cero al igual que la de Inflow.

- **Outflow:** Esta condición de contorno se establece en las áreas no nombradas con anterioridad, en estas se establece una condición de Neumann de gradient-zero para la velocidad y la fracción de volumen y una condición de Dirichlet para la presión, estableciendo un valor de presión atmosférica.

5.3. Postprocesado de datos

En este apartado se va comentar como se ha procesado toda la información obtenida de los resultados de la simulación para obtener los parámetros que se han querido comparar para ver los efectos en la atomización primaria que ha tenido el cambio del número de Weber.

5.3.1. Spyder

Tras obtener los datos se han realizado los siguientes procesados de datos por un lado se ha realizado lo que se conoce como PDFs, o funciones de densidad probabilísticas, explicadas en el apartado 3.5. En este proyecto se obtienen las PDFs mediante el uso del software conocido como *Spyder*, explicado en el apartado 4.2.2., para esto se ha utilizado múltiples scripts para conseguir las PDFs.

En un primer lugar, una vez se obtienen los resultados de la simulación realizada en *Basilisk* lo que se realiza es un filtrado de los resultados para eliminar las gotas que se hayan contado doble y con los datos obtenidos de este filtrado se obtiene un archivo .mat con todos los resultados de la simulación.

Tras estos, los datos del archivo .mat se ha procesado para crear las PDFs de ambos casos. Las PDFs realizadas, son de varios parámetros, tales como la posición de las gotas en función del tamaño, la velocidad del fluido, en todos sus componentes o el número de gotas.

Tras esto se procede a graficar las PDFs para su análisis de manera visual y su comparación, el script que se ha utilizado permite el mostrar las PDFs graficadas de manera individual o junto a otras, permitiendo un análisis visual rápido de las diferencias entre las PDFs de los combustibles.

5.3.2. Paraview

Como se ha mencionado previamente en el apartado 4.2.2. *Paraview* es un programa gratuito que permite la visualización de postprocesado para diferentes simulaciones y cálculos. En este trabajo el principal uso que se le ha dado a este software es el control de la simulación, aunque se ha utilizado además para el postprocesado de la simulación.

Con *Paraview* se han obtenidos imágenes tanto del flujo interno, el flujo externo y de la

salida de atomizador, para poder comparar de manera visual qué cambios sufre la atomización por el cambio de número de Weber en cada simulación, además de permitir observar a simple vista donde se encuentran las regiones con mayor cantidad de gotas o donde hay más turbulencia.



Análisis de Resultados

En el capítulo se busca presentar los resultados obtenidos mediante las simulaciones de flujo externo realizadas con *Basilisk*. En primer lugar, se realizará un análisis cuantitativo de los resultados, mediante la comparativa de diversas PDFs. En segundo lugar para facilitar el análisis visual de los resultados se realizará un análisis cualitativo de la atomización mediante la visualización de distintos instantes temporales de ambos casos. Este análisis comparativo tiene como objetivo comprender los efectos que tiene el número de Weber sobre la atomización primaria.

6.1. Análisis cuantitativo

Como se ha comentado en la introducción de este capítulo el análisis de cuantitativo se va a realizar mediante la utilización de PDFs o *Probability Density Functions*, que se explican en el apartado 3.5, así como otras gráficas sobre la evolución de las gotas en cada una las simulaciones.

6.1.1. Evolución del Número de Gotas

En primer lugar y una de las características más interesantes e importantes para observar los efectos del número de Weber es observar el número de gotas generadas en cada uno de los casos. Conocer el número de gotas es bastante importante ya que es un indicador claro de la calidad de la atomización, ya que para una mismo caudal de fluido este aumento de gotas nos indica una mayor superficie de contacto entre combustible y aire.

Por un lado, se va a presentar la evolución de las gotas a lo largo de los $300 \mu\text{s}$, y luego se presentará la comparativa de la evolución de ambas para apreciar mejor la diferencia entre los dos casos.

Como se puede observar, para ambos casos la evolución del número de gotas se podría casi llegar a establecer como una relación lineal entre el tiempo y el número de gotas que hay. Cabe observar además como en la figura 6.1 c) se aprecia como divergen entre si, provocando que al final de la simulación el caso base de alcance un número de gotas aproximado de $3.0 \cdot 10^4$, mientras que, el número de gotas que alcanza el caso de alto número de Weber alcanza

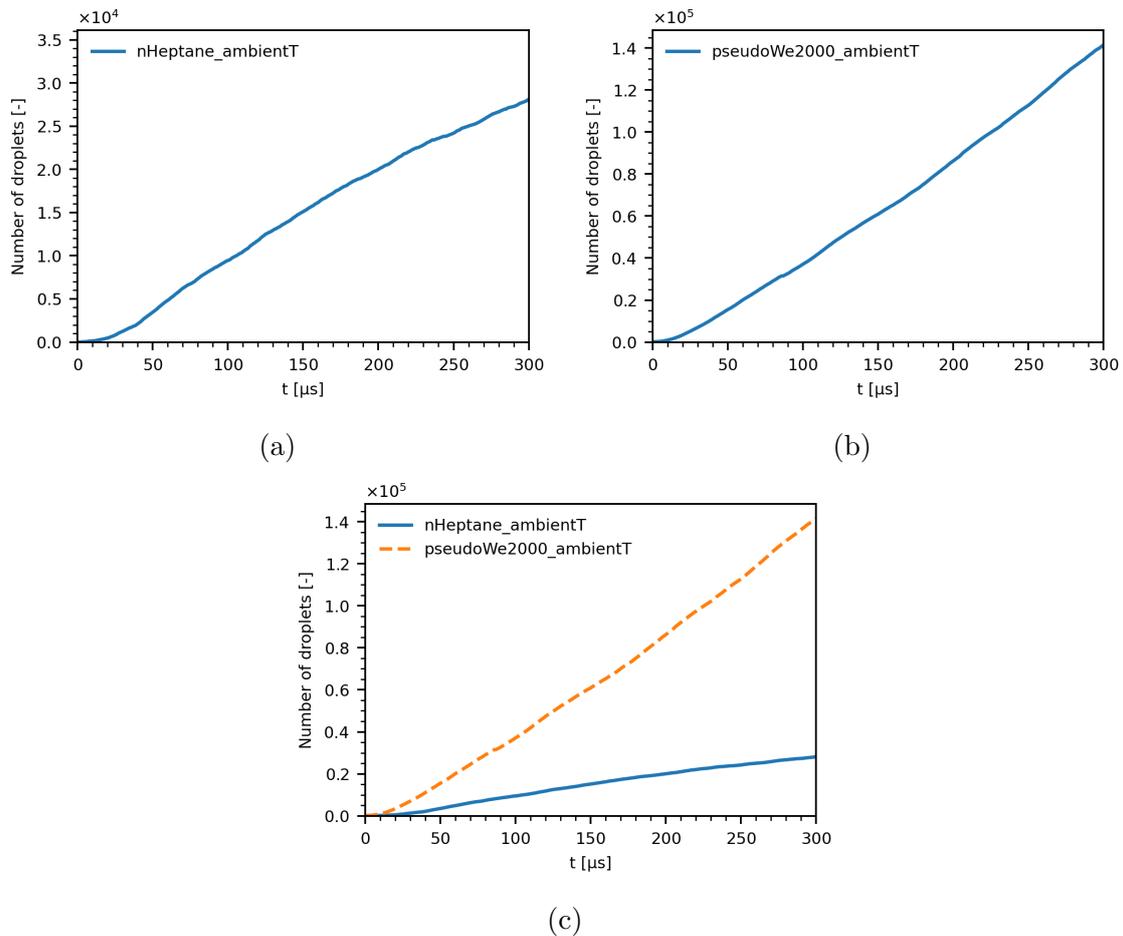


Figura 6.1: Evolución del número de gotas en para cada caso, a) NHeptano y b) Pseudo-We2000, y c) Comparativa.

aproximadamente $1.4 \cdot 10^5$, siendo el valor del segundo caso entre 4 y 5 veces mayor que en el primero, esta relación se mantiene de manera aproximada a lo largo del periodo tiempo estudiado.

6.1.2. Número de gotas según SMD

En este apartado se explorará el número de gotas que se generan en la simulación en función del SMD. El SMD o *Sauter Mean Diameter*, es una medida aproximada del tamaño de una partícula definida por Josef Sauter, este define el diámetro que tendría una gota el mismo ratio de volumen/área que el de la partícula o gota estudiada [11].

Se van a presentar, al igual que, en el apartado anterior, gráficas en primer lugar los datos correspondientes a los casos de manera particular y luego una comparativa de ambos casos, en adición se representan las gráficas en escala logarítmica, para poder observar mejor en aquellos casos donde el SMD es muy grande y el número de gotas es menor.

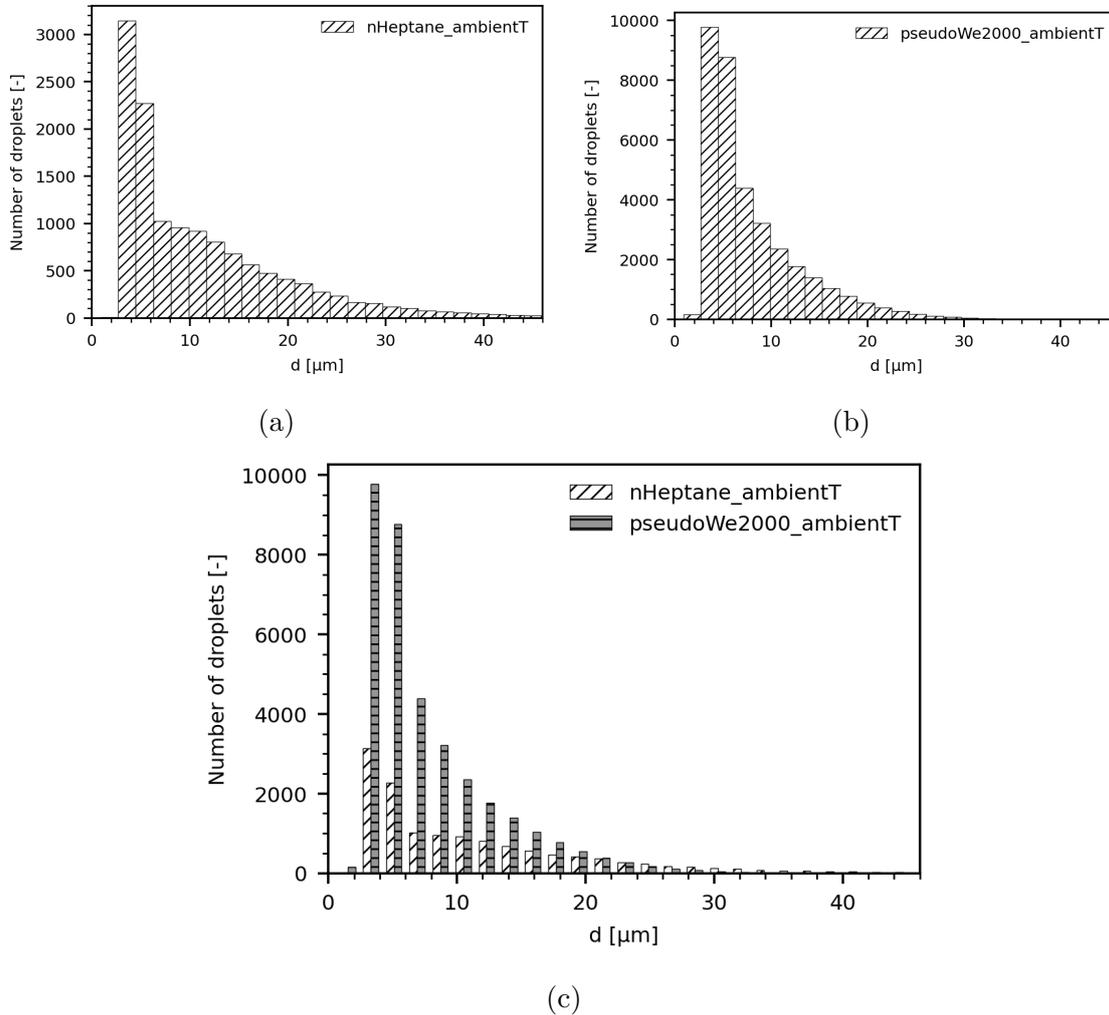


Figura 6.2: Número de gotas según su SMD, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa.

Como era de esperar, debido a los resultados del apartado previo, en la figura 6.2 es observable que el número de gotas generadas en el caso del número de Weber alto es mucho mayor que el del caso base, no obstante, en ambos casos es observable como la tendencia en ambos casos es que las gotas con un SMD menor sean las más abundantes.

No obstante, una cosa curiosa es observable en la figura 6.3 c) ya que en la comparativa de ambos casos se puede observar que una vez alcanzado un SMD de aproximadamente $24\mu\text{m}$ el número de gotas del caso base es mayor que el del caso con el número de gotas con Weber alto. Esto se puede deber a que, al ser el número de Weber inversamente proporcional a la tensión superficial del fluido, el aumento del número de weber provoca que la tensión superficial del fluido disminuya, provocando que le cueste menos romper la vena líquida de

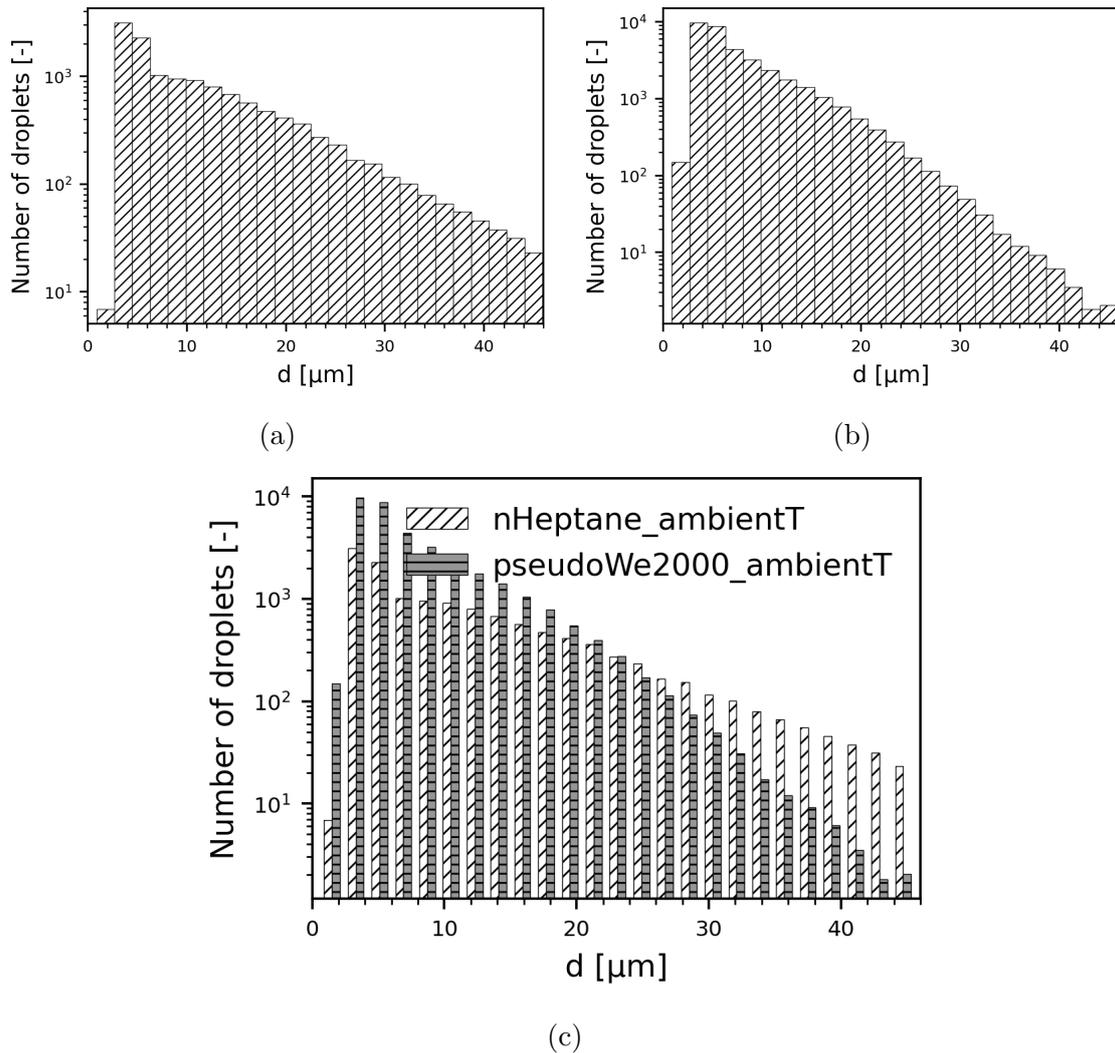


Figura 6.3: Número de gotas según su SMD en escala logarítmica, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa.

las nuevas estructuras generadas y por lo tanto que sea más difícil que gotas de un cierto tamaño no acaben disgregándose en otras de menor tamaño.

6.1.3. Distancia Axial

En este apartado se van a exponer los datos referentes a la densidad de número de gotas según la distancia axial a la que estas se encuentren. Para esto, se presentan las gráficas correspondientes a las PDFs por distancia axial, ya que en estas nos muestran la probabilidad de encontrar gotas a diferentes distancias del orificio de salida.

En la figura 6.4, se puede observar claramente como la tendencia en ambos casos es bastante

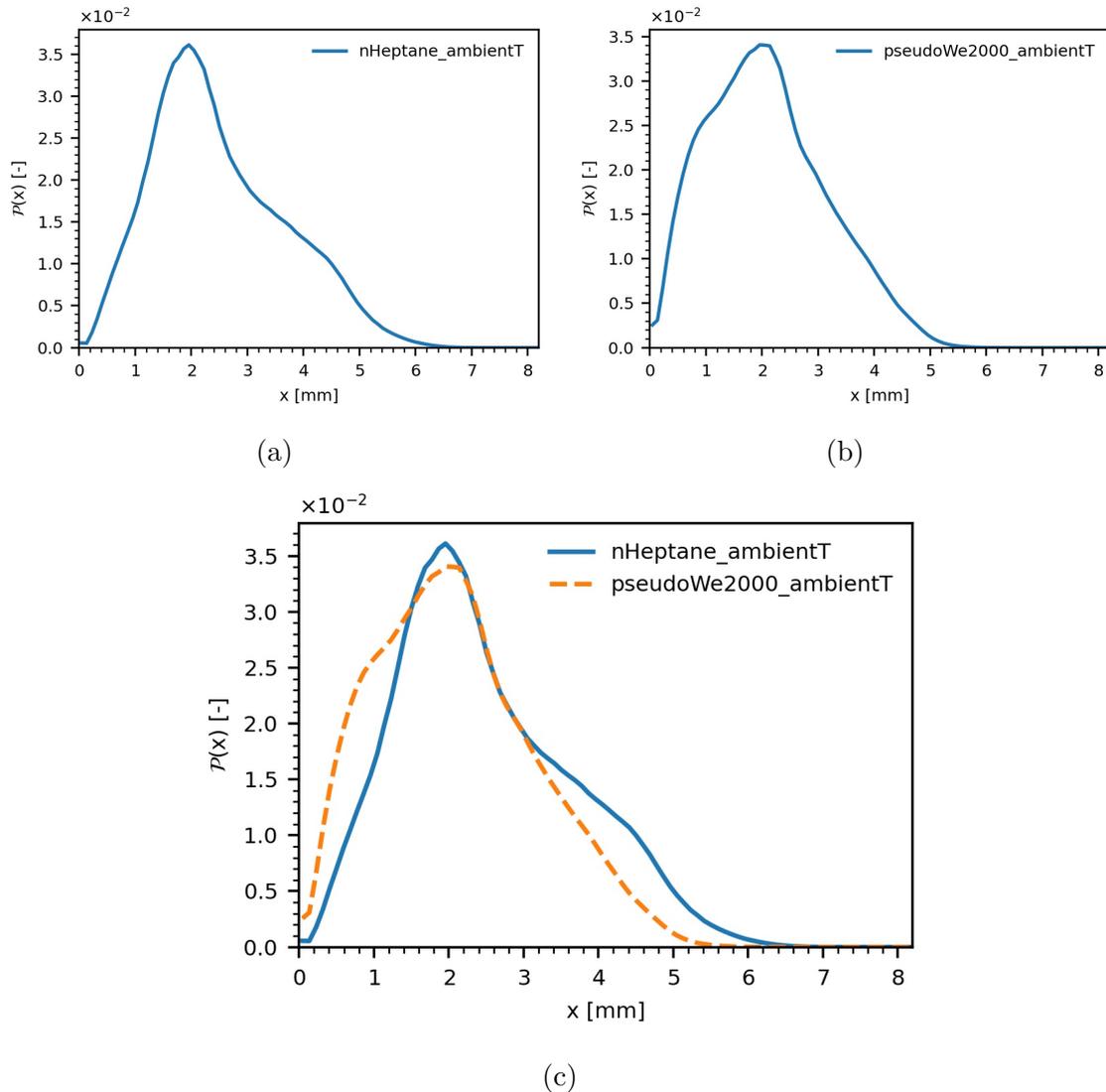


Figura 6.4: Pdf según la distancia axial, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa.

similar, en un primer lugar, la probabilidad de encontrar gotas va en aumento en función de la distancia axial hasta que se alcanza un pico máximo, ambos aproximadamente a la misma distancia. Luego la probabilidad va en detrimento hasta tender prácticamente a 0. Este comportamiento común en ambos casos muestra cómo en primera instancia se generan las gotas y como el número de estas aumenta en función de que el fluido sale del atomizador y se aleja del mismo, interactuando el líquido con el aire y generando cada vez más gotas. Esto sucedería hasta que se alcanza el diámetro crítico, momento en el cual ya no se generarían más gotas y estas irían dispersándose e incluso pudiendo volver a juntarse entre sí debido a los choques entre las mismas.

En las siguientes gráficas que se presentan se observa, al igual que las anteriores, la pro-

babilidad de encontrar gotas de en función de la distancia al orificio de salida a la que se encuentren, sin embargo, en este caso, se ha distinguido también según el tamaño de gotas.

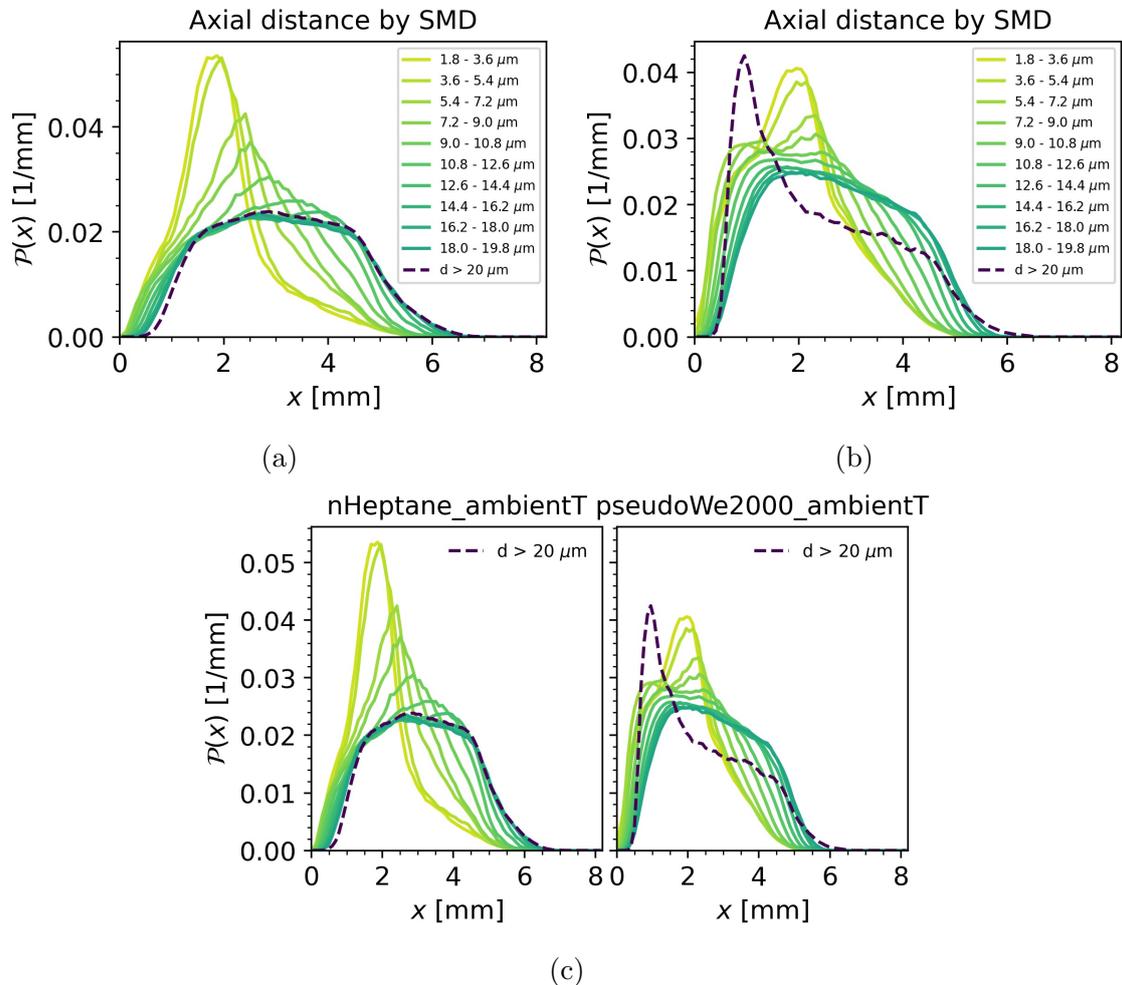


Figura 6.5: Número de gotas según su SMD en escala logarítmica, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa.

Es observable, pues, que en ambos casos la tendencia es similar. La probabilidad de encontrar gotas de menor tamaño se acumula en las distancia más cercanas al orificio de salida y que disminuye al alejarse. En cambio, la probabilidad de encontrar gotas de mayor tamaño es mayor que la de encontrar de menor tamaño al alejarse del punto de máximo número de gotas, esto confirmaría lo que antes se ha comentado sobre como estas se dispersan e incluso podían llegar a interactuar entre sí, formando gotas de mayor tamaño.

Además de las tendencias que comparten ambos casos, en el caso del número de Weber alto, se puede observar cómo las gotas de mayor tamaño se concentran al inicio de la atomización, y cómo se ve la tendencia que a mayor tamaño se acumulen más cerca del orificio de

salida. Esto tiene en parte sentido, ya que a la salida del atomizador es común que el fluido pueda no llegarse a atomizarse mientras y que, a la hora de procesar los datos, el programa detecte esos volúmenes de fluido como gotas de gran tamaño. Por otro lado, en el caso del nHeptano se puede observar cómo las gotas de tamaño más grande tienen un pico a cierta distancia del orificio de salida, esto se debe, a que cómo se observa en análisis cualitativo en el apartado , específicamente en las imágenes del caso del nHeptano, se genera una zona donde las gotas son de mayor tamaño.

En las siguientes gráficas se disponen las mismas relación de datos, pero en este caso se va establecerá la probabilidad de encontrar gotas según el tamaño, representado cada línea una franja de distancia axial.

En la figura 6.6, es observable lo mismo que se ha podido ver en las múltiples gráficas

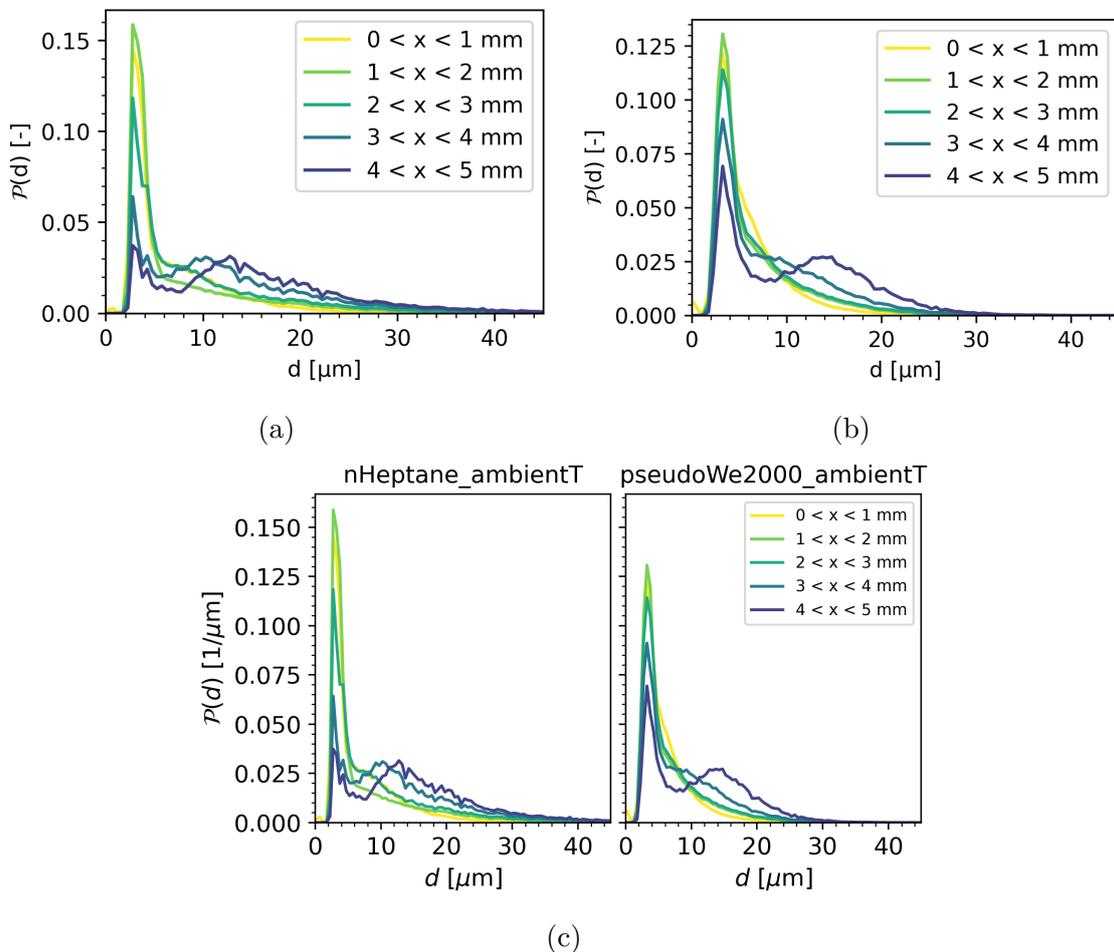


Figura 6.6: Número de gotas según su SMD y el la distancia a la que se encuentran del orificio de salida, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa.

hasta el momento; la probabilidad de encontrar gotas de menor tamaño ha distancia meno-

res del orificio de salida es mayor que ha distancias mayores, y que cuando la distancia al orificio de salida es mayor pese a que se siguen encontrando más gotas de menor tamaño la probabilidad de encontrar de mayor tamaño aumenta.

6.1.4. Velocidades

En este apartado del análisis cuantitativo se van a explorar los efectos sobre las velocidades del combustible. En primer lugar, se van a exponer los resultados de cada uno de los componentes de la velocidad como PDFs, luego se expondrá la magnitud de velocidad, también como PDF.

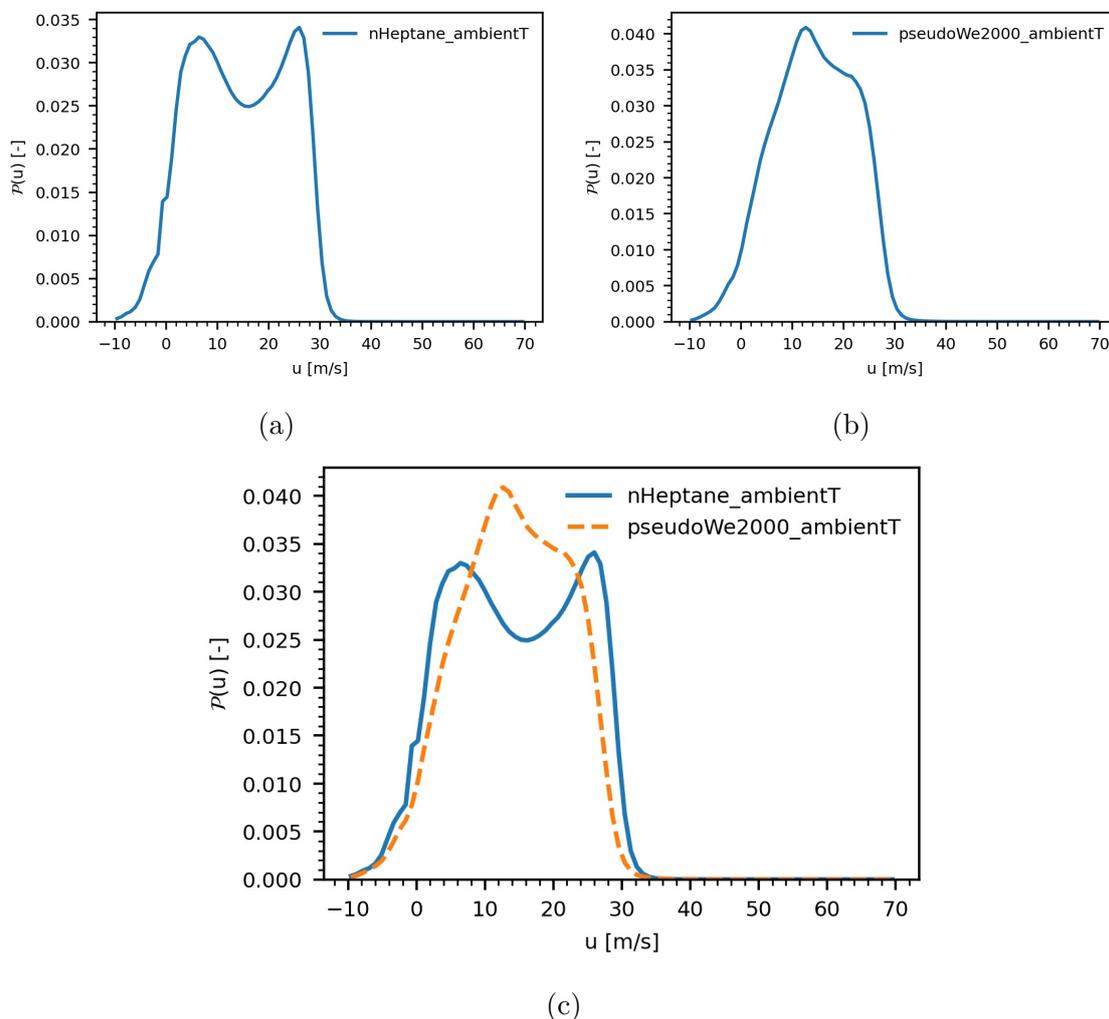


Figura 6.7: PDFs componte U de la velocidad, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa.

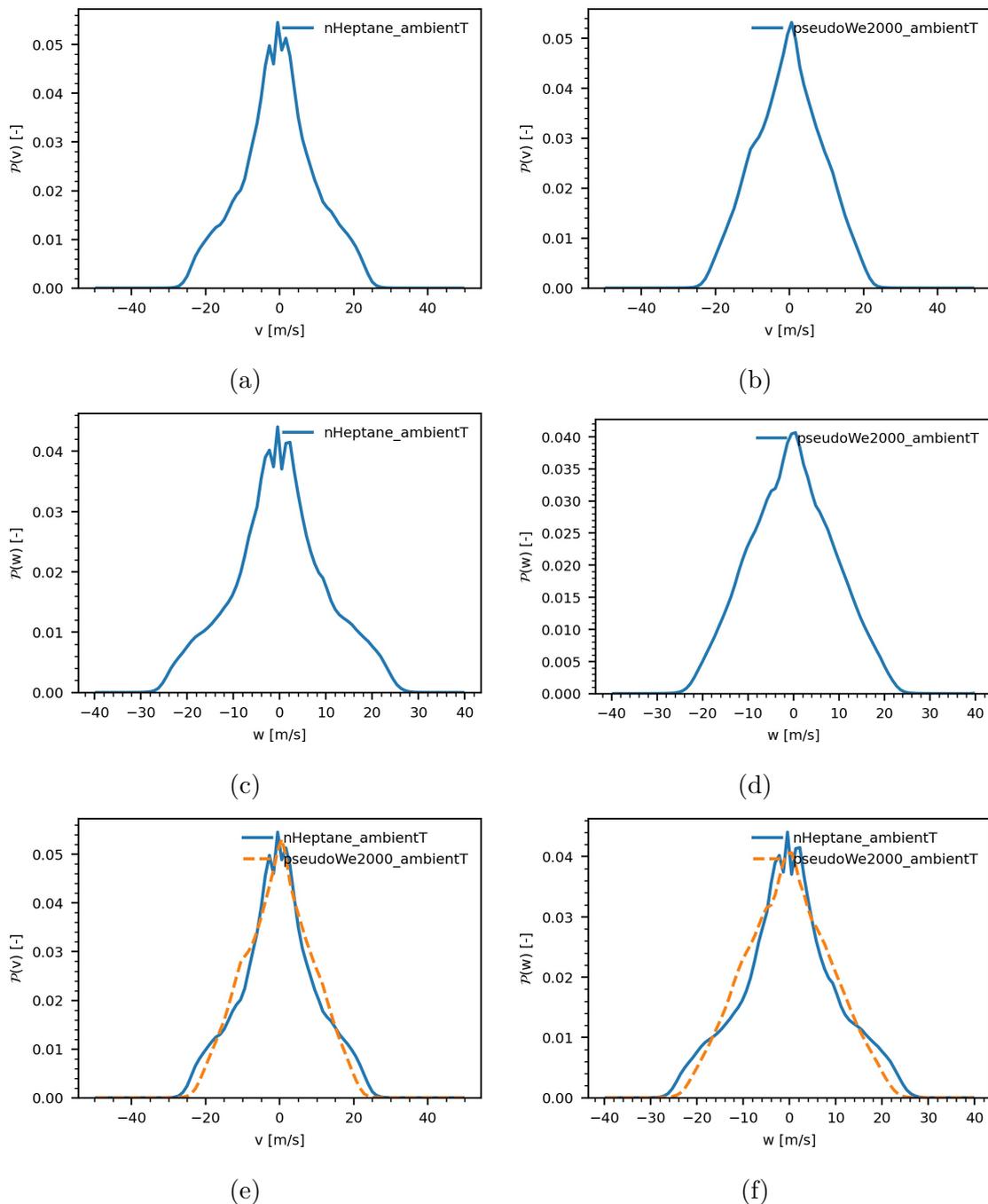


Figura 6.8: PDFs componente azimutal y radial de la velocidad.

En primer lugar, se ve como el componente de la velocidad que domina la velocidad del fluido en su conjunto es el axial, esto es observable en que las PDFs del componente axial y los de la magnitud de la velocidad son bastante similares entre sí.

En segunda instancia cabe destacar la similitud entre los perfiles de velocidad de los compo-

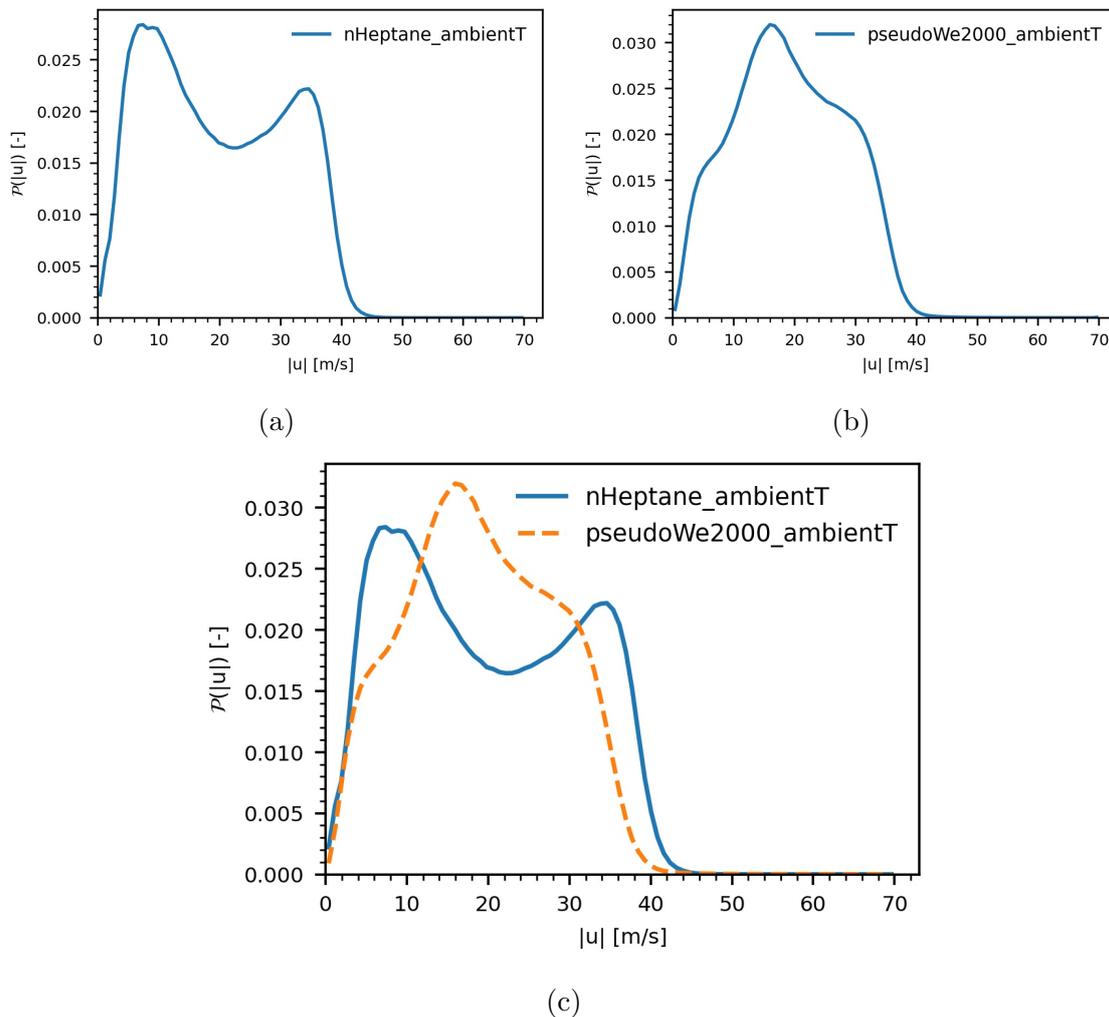


Figura 6.9: PDFs componente U de la velocidad, a) NHeptano y b) PseudoWe2000, y c) Comparativa .

nentes azimutal y radial entre los casos, pudiendo suponer que la variación sobre el número de Weber no afecta en gran medida a estos componentes.

Por último, es observable que sí que hay una diferencia clara entre el caso base y el del número de Weber alto, tanto en el componente axial como en la magnitud de velocidad se puede observar que la velocidad máxima es menor, esto se puede deber a que el mayor número de gotas, como se ha visto en los apartados anteriores, aumenta la superficie de contacto con el aire del fluido en su conjunto, y por lo tanto el intercambio de energía cinética debida al rozamiento con el aire aumentará y por lo tanto la velocidad máxima media de las gotas es menor. La disminución de la velocidad axial sería lo que provocaría, como se ve en la figura 6.4, que en el caso de Weber alto la distancia máxima a la que se puede encontrar gotas disminuya.

6.2. Análisis Cualitativo

En este apartado se va a explorar de manera visual cómo evoluciona la simulación. En primer lugar, se va a mostrar un comparativa entre ambas simulaciones para $t=50\mu s$, luego de $t=100\mu s$, y por último en $t=300\mu s$.



(a) Nheptano



(b) $We=2000$

Figura 6.10: Comparativa instante $t=50\mu s$.

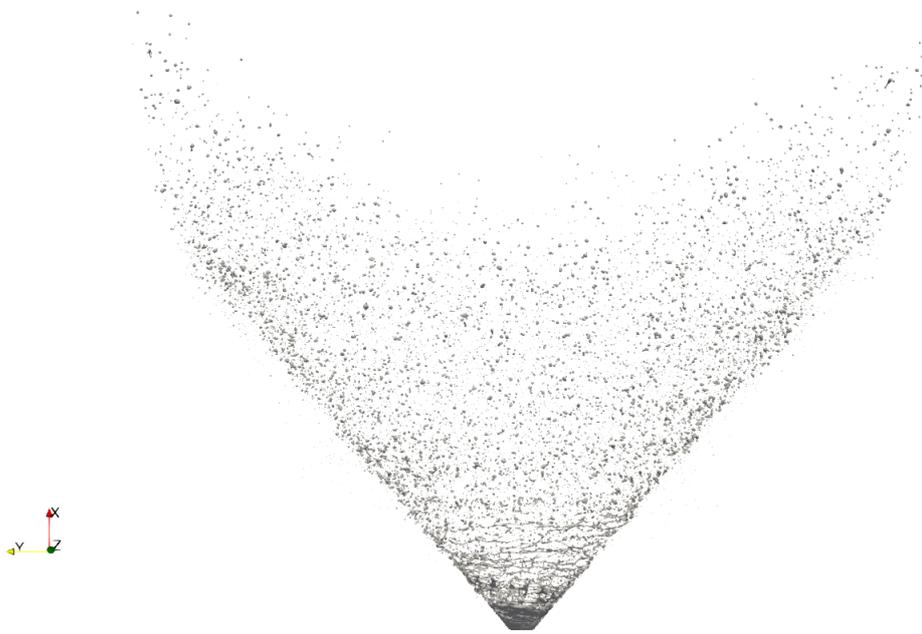


(a) NHeptano



(b) $We=2000$

Figura 6.11: Comparativa instante $t=100\mu s$.



(a) NHeptano



(b) We=2000

Figura 6.12: Comparativa instante $t=300\mu s$.

Lo primero observable a simple vista, y que complementa a los resultados obtenidos en las PDFs que se han mostrados en los apartados anteriores, es que la cantidad de gotas que presenta en los tres instantes temporales el caso de número de Weber alto es claramente mayor que en el caso base.

Además, es observable en la figura 6.12 que las gotas que aparecen son todas de un tamaño más parecido entre sí y con menor porcentaje de gotas de gran tamaño.

Por último, en el caso del nHeptano se observa claramente como a corta distancia del orificio de salida la aparición de ligamentos antes de la desintegración de los mismos, mientras que en el caso de número de Weber alto estos ligamentos que se forman previos a la formación de gotas no aparecen o son lo suficientemente pequeños para no ser distinguibles, pudiendo suponer que la aparición de estos ligamentos en la membrana líquida comenzaría en el interior del atomizador.

Conclusión y desarrollos futuros

En este último capítulo de la memoria, se expondrán las conclusiones obtenidas de la realización del proyecto y del análisis de los resultados. Además, se planteará brevemente como se pueden aplicar las conclusiones de este proyecto y cómo se puede seguir desarrollando el mismo.

7.1. Conclusiones

A raíz de la realización de este trabajo y de los resultados obtenidos se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Se establece el estudio de la atomización la atomización primaria como un proceso necesario para el diseño de diseños de combustión, ya que la calidad de la misma y de los productos de la misma, depende en gran parte de la calidad de la atomización.
- Los efectos de número de Weber son bastante importantes para la atomización y las características de la población de las gotas, habiendo sido estudiado un combustible base, el nHeptano, y un pseudo combustible con el número de Weber aumentado, se ha observado el efecto que tiene el número de Weber no solo esta directamente relacionado con el número de gotas que se generan, si no que también en como se distribuyen las mismas y sus tamaños, modificando por lo tanto el patrón que genera la atomización como en la penetración de la misma, ya que esta segunda es menor en el caso del número de Weber alto.
- Con todo los resultados obtenidos en el gracias a las simulaciones realizadas se puede esperar que aquellos combustibles que presenten un número de Weber más alto facilitarán la atomización y esta será de mayor calidad, facilitando al combustión debido al aumento de la superficie de contacto entre el combustible y el aire.

7.2. Futuros desarrollos

En este Trabajo de Fin de Grado se ha estudiado los efectos de un parámetro de los múltiples que afectan a la atomización, esto implica a que queda abierto el estudio de los efectos que tendría el número de Reynolds u otros parámetros.

Además las conclusiones obtenidas, se puede usar por una parte la predicción de que combustibles tendrán una mejor atomización en los atomizadores *pressure-swirl*, así de que características físicas se buscan conseguir en el desarrollo de combustibles sintéticos.

Por último se podría llegar a realizar una simulación de la combustión del combustible que se ha atomizado a partir de los datos obtenidos, para corroborar los efectos que tienen el aumento de la población de las gotas en la energía obtenida de la combustión y de los productos de la combustión.



Bibliografía

- [1] C. Mataix, *Turbomaquinas termicas : turbinas de vapor, turbinas de gas, turbocompresores*, 2nd ed. Madrid: Dossat, 1988 - 2000.
- [2] V. G. M. Lefebvre, Arthur H., *Atomization and Sprays*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017-.
- [3] L. A. T. H. N. A. Salvador F.J., Martí-Aldaraví P., “Droplet characterization of a pressure-swirl atomizer by means of high-fidelity modelling based on DNS simulations,” *Elsevier Ltd*, vol. 358, no. 130169, pp. 14 – 14. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85175011508&origin=resultslist>
- [4] H. Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume methods*. Harlow: Longman, 1998.
- [5] “Estudio computacional del flujo interno y atomización primaria en un inyector aeronáutico “pressure-swirl” mediante técnicas avanzadas de mallado.” [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10251/17136>
- [6] S. Popinet, “Gerris: a tree-based adaptive solver for the incompressible euler equations in complex geometries,” *Journal of Computational Physics*, vol. 190, no. 2, pp. 572–600, 2003. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999103002985>
- [7] A. L. Antón, “Cálculo cfd de la turbulencia en toberas de inyección mediante simulaciones les para su aplicación al cálculo de la atomización primaria mediante dns,” 9 2018. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/106782>
- [8] F. A. Williams, *Combustion theory*, 2nd ed., ser. Combustion science and engineering series. Menlo Park: Benjamin Cummings, 1985.
- [9] ("2024") "python". [Online]. Available: <https://www.python.org/>
- [10] M. Crialesi-Esposito, L. Gonzalez-Montero, and F. Salvador, “Effects of isotropic and anisotropic turbulent structures over spray atomization in the near field,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 150, p. 103891, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301932221003037>

- [11] J. Sauter, *Die Grössenbestimmung der im Gemischnebel von Verbrennungskraftmaschinen vorhandenen Brennstoffteilchen: (Mitteilg aus d. Laboratorium f. techn. Physik d. Techn. Hochschule München)*, ser. Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. VDI-Verlag, 1926. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=5pcinQEACAAJ>



Parte II

Pliego de Condiciones



Introducción

En este apartado se procede a definir los requisitos técnicos y legales que se han establecido en el desarrollo de este proyecto. Seguir estos requisitos correctamente asegura un adecuado desarrollo del proyecto.

El trabajo ha constado de la realización de diversas simulaciones tanto de LES como DNS para estudiar la formación y del desarrollo de las gotas a la salida de un atomizador tipo pressure-swirl. Debido a que no se han hecho pruebas experimentales durante el desarrollo del trabajo no se presentaran ni las condiciones facultativas ni las de seguridad correspondientes a pruebas experimentales.

Por lo antes expuesto, se desarrollarán las características de los equipos usados, incluidos hardware y software, y sobre el puesto de trabajo

Equipos de Trabajo

En la realización del trabajo se han utilizado diferentes equipos informáticos y softwares, en este apartado se exponen.

Equipo propio

Equipo aportado de manera personal para la monitorización de las simulaciones y la redacción de este trabajo. Las características del mismo se describen a continuación:

- **Modelo:** Asus Zenbook 14 LAPTOP-8REHC3GR
- **Procesador:** AMD Ryzen 7 3700U with Radeon Vega Mobile Gfx 2.30 GHz
- **Memoria:**16,0 GB
- **Almacenamiento:** 475 GB
- **Sistema Operativo:** Windows 11 Home
- **Teclado integrado**
- **Ratón inalámbrico**
- **Monitor integrado**

Estación de cálculo

Para la realización de los cálculos de las simulaciones se ha utilizado dos equipos, por una parte, el Cluster del CMT y por otra parte el superordenador conocido como MareNostrum. El superordenador de CMT ha sido utilizado para la realización de cálculos de LES que se han utilizada para la obtención de los cálculos internos del atomizador con el objetivo de conseguir los datos de entrada del combustible al volumen de control, mientras que el MareNostrum se ha utilizado para realizar los cálculos de flujo externo debido a que es necesario una mayor potencia de cálculo debido a la resolución buscada. Las características de Marenostrum se encuentran en su página [?]

Software

Los programas utilizados en el desarrollo del trabajo son los siguientes:

- LaTeX: programa para la generación de texto utilizado para la realización del trabajo.
- Oracle Virtual Box: utilizado como máquina virtual de ubuntu y para trabajar en ordenadores de forma remota.
- OpenFoam: programa para realizar los cálculos LES.
- Basilisk: programa para realizar los cálculos DNS.
- ParaView: programa para visualizar los resultados de las simulaciones.

Condiciones de trabajo

Las características computacionales del proyecto que se ha desarrollado conllevan que la persona que ha llevado a cabo el proyecto se pueda ver sometida a molestias que reduzcan su rendimiento o afecten a su bienestar. Debido a esto se busca controlar ciertos aspectos que puedan aumentar la posibilidades, sufrir fatiga, estrés, dolores, u otros padecimientos.

Como referencia para prevenir los riesgos laborales, se ha tomado el Real Decreto de 488/1997 del 14 de abril donde se recoge la normativa de seguridad y salud en lo que respecta a trabajos relacionados con la visualización de pantallas.

Las condiciones laborales que se han de cumplir debido según esa normativa se enumeran y detallan a continuación:

- **Condiciones del equipo:** El equipo tiene que estar diseñado para no poner en riesgo la salud ni el bienestar de los trabajadores.
 - **Pantalla:** Los caracteres de la pantalla han de estar bien definidos y de manera tal que sean fácilmente reconocibles por los trabajadores, así como la imagen ha de

ser estable y sin parpadeos o destellos, pudiendo el trabajador modificar el brillo y contraste de la misma para adaptarla a las condiciones ambiente y controlando la inclinación y la altura de la pantalla bien sea por el uso de un pedestal o una mesa regulable.

- **Teclado:** Este ha de ser inclinable e independiente de la pantalla para que se pueda adoptar una postura cómoda, además de tener espacio suficiente delante para poder apoyar los brazos y las manos, tener una superficie mate y que sus teclas y caracteres faciliten su utilización y visualización desde una postura normal de trabajo.
 - **Mesa o superficie de trabajo:** El tamaño de la mesa o superficie de trabajo ha de ser lo suficientemente grande para la colocación flexible de la pantalla, así como del teclado, los documento y accesorios necesarios, además de que el soporte de los documentos a de ser estable y regulable para evitar al mínimo los movimientos incómodos de cabeza y ojos.
 - **Asiento:** Los asientos tiene que ser estables y proporcionar libertad de movimiento y una postura cómoda a los trabajadores, así como ser regulables en altura e inclinación e incluir un reposapiés para quien lo desee.
- **Espacio:** El puesto de trabajo será lo suficientemente grande como para permitir los cambios de postura y movimientos de trabajo.
 - **Iluminación:** la iluminación general y especial, deberán garantizar niveles adecuados de iluminación y la correcta relación entre la de la pantalla y el entorno. La colocación de la luz, así como el acondicionamiento del lugar de trabajo, se tendrán que hacer de tal manera que se eviten deslumbramiento y reflejos molestos para el usuario.
 - **Ruido:** El ruido ha de tenerse en cuenta el del equipo durante su diseño para evitar que perturbe la atención o la palabra.
 - **Calor:** Los equipos instalados no deberán producir calor extra que perjudique a los trabajadores.
 - **Emisiones:** Toda radiación fuera del espectro visible ha de estar reducida de tal manera que no afecte a la salud de los trabajadores.
 - **Humedad:** Ha de mantenerse en niveles aceptables
 - **Conexión ordenador/persona:** Para la elección, compra y modificación de programas como la definición de tareas que requieran el uso de pantallas de visualización se tendrán en cuenta los siguientes factores:
 - El programa utilizado a de estar a la tarea realizada.
 - El programa será fácil de utilizar, y podrá adaptarse al nivel y experiencia del usuario. No pudiendo utilizar dispositivos de control sin el conocimiento del trabajador.

- Lo programas deberán informar a los trabajadores indicaciones sobre su desarrollo.
- Los sistemas deberán presentar la información en un formato y velocidad adaptada al operario.
- Lo principio de ergonomía deberán aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte de la persona.



Parte III

Presupuesto



Introducción

En este documento se va definir el coste que tiene la realización del proyecto realizado de manera estimada. Para esto se va a dividir el coste en dos partes, mano de obra y costes de equipo o costes computacionales.

Para los diferentes gastos se aplicarán las actuales tarifas legales y en caso de no existir se hará las estimaciones más plausibles posibles. En adición se aumentará un 10 % para prevenir posibles imprevistos.

Presupuesto de Computación

En esta sección se va a definir los gastos relacionados con la computación del caso, es decir, el software y el hardware utilizado en la realización del proyecto.

En primer lugar, en lo que hace referencia al software utilizado, estos no han repercutido en gasto alguno ya que los utilizados en el proyecto, OpenFoam, Basilisk, ParaView y Spyder, son en su totalidad de código abierto, por lo tanto gratuitos.

En lo que respecta a el gasto en hardware se incluirá también en el coste de uso del portátil y de la estación la correspondiente licencia de Microsoft Office.

Para calcular la amortización de los equipos en primer lugar se van a calcular las horas laborales que tiene un año:

$$40 \frac{\text{horas}}{\text{semana}} \cdot (52 - 6) \frac{\text{semanas}}{\text{año}} = 1840 \frac{\text{horas}}{\text{año}} \quad (7.1)$$

En lo que se refiere al portátil, se estima un periodo de amortización de 8 años aproximadamente, y su coste de adquisición fue alrededor de 1000€ por lo que nos sale una amortización de:

$$\frac{1000\text{€}}{8\text{años} \cdot 1840 \text{ horas/año}} = 0,068 \text{ €/hora} \quad (7.2)$$

Para la estación de cálculo se estima un periodo de 5 años de amortización y un coste de la misma de 3000€, saliendo un valor de amortización de:

$$\frac{3000\text{€}}{5\text{años} \cdot 1840 \text{ horas/año}} = 0,326 \text{ €/hora} \quad (7.3)$$

En lo que respecta a la licencia de Microsoft Office, el coste para empresas es de 67,2 € al año

PRESUPUESTO

por usuario, saliendo una amortización de :

$$\frac{67,2\text{€}}{1\text{ año} \cdot 1840 \text{ horas/año}} = 0,037 \text{ €/hora} \quad (7.4)$$

El Presupuesto del gasto computacional es el siguiente:

Presupuesto Computación				
Concepto	Unidad	Cantidad	Coste/Unidad	Coste Total
Portátil	h	600	0,068 €/h	40,80 €
Estación	h	380	0,326 €/h	123,88 €
Licencia	h	600	0,037 €/h	22,20 €
Coste Total				186,88 €

Cuadro 7.1: Resumen Presupuesto de Computación

Presupuesto mano de obra

En este apartado se van a detallar los costes referentes a la mano de obra que ha intervenido en la realización del proyecto. Para esto se tiene en cuenta con los siguientes interventores en el proyecto, un alumno de grado como becado en prácticas de empresa, un doctorando en calidad de investigador y un doctor como tutor e investigador.

Para calcular el coste de cada uno de los puestos por hora se ha vuelto a utilizar las 1840 horas/año que se ha utilizado en el apartado previo.

Personal	Coste Anual [€]	Coste Horario [€]
Catedrático	47,573	25,86
Ayudante	31,086	16,90
Becado	4,704	2,55

Cuadro 7.2: Costes por horas de cada trabajador involucrado.

Personal	Coste Horario [€]	Dedicación[h]	Coste Humano[€]
Catedrático	25,86	30	775,8
Ayudante	16,90	400	6760
Becado	2,55	600	1530
Coste Total[€]			9.065,8

Cuadro 7.3: Coste de mano de obra, resumen



Presupuesto Total

En este apartado se va detallar el presupuesto final del proyecto, teniendo en cuenta un 5 % por imprevistos y un 21 % de IVA.

Concepto	Coste[€]
Mano de Obra	9065,80
Computación	186,88
Presupuesto Parcial	9252,68
Imprevistos (5 %)	462,63
IVA (21 %)	2040,22
Coste Total	11755,53