

El principal desafío en los motores turbina de gas empleados en aviación reside en aumentar la eficiencia del ciclo termodinámico manteniendo las emisiones contaminantes por debajo de las rigurosas restricciones. Ésto ha conllevado la necesidad de diseñar nuevas estrategias de inyección/combustión que operan en puntos de operación peligrosos por su cercanía al límite inferior de apagado de llama. En este contexto, el concepto Lean Direct Injection (LDI) ha emergido como una tecnología prometedora a la hora de reducir los óxidos de nitrógeno (NOx) emitidos por las plantas propulsoras de los aviones de nueva generación.

En los quemadores de flujo continuo LDI, el combustible líquido se inyecta en unas proporciones de mezcla pobre directamente en la cámara de combustión, donde se encuentra un flujo de aire coaxial altamente torbellinado. Este flujo altamente turbulento promueve tanto la atomización de la película de combustible líquida como el mezclado del spray atomizado con el aire, a la vez que genera una zona de recirculación inmediatamente aguas abajo del sistema de inyección que incrementa de manera considerable el límite de estabilidad de la llama. Por tanto, se requiere de una caracterización precisa del grado de atomización del combustible líquido, la dispersión turbulenta y evaporación de las gotas de combustible y la calidad de la mezcla aire-combustible, ya que estos fenómenos influyen fuertemente en el rendimiento de la combustión y las emisiones contaminantes posteriores.

En este escenario, los métodos basados en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se han convertido en un componente esencial en el proceso de diseño de sistemas de combustión de turbinas de gas por su idoneidad para optimizar indicadores clave de desempeño a través de estudios paramétricos rápidos y relativamente poco costosos. Concretamente, las simulaciones basadas en tratamientos de turbulencia LES se consideran la herramienta de diseño numérico de la siguiente generación para predecir e investigar la generación y evolución de estructuras de flujo coherentes en cámaras de combustión de turbinas de gas, tanto en condiciones reactivas como no reactivas. La caracterización del flujo inerte es un primer paso crucial en la investigación de quemadores LDI, ya que el éxito o el fracaso de la ignición (y la re-ignición a gran altitud) viene determinado por las condiciones locales presentes momentos antes de la ignición, especialmente por la calidad de la mezcla y el nivel de turbulencia en la región cercana a la inyección.

En este contexto, la presente tesis tiene como objetivos contribuir al conocimiento de los mecanismos físicos que rigen el comportamiento de un quemador LDI y proporcionar herramientas de análisis para una profundacaracterización de las complejas estructuras de flujo de turbulento generadas en el interior de la cámara de combustión. Para ello, se ha desarrollado una metodología numérica basada en CFD capaz de modelar el flujo bifásico no reactivo en el interior de un quemador LDI académico mediante enfoques de turbulencia U-RANS y LES en un marco Euleriano-Lagrangiano. El quemador LDI tomado como referencia para llevar a cabo la investigación es el quemador académico CORIA Spray Burner. La resolución numérica de este problema multiescala se aborda mediante la descripción completa del flujo a lo largo de todos los elementos que constituyen la maqueta experimental, incluyendo su paso por el swirler y entrada a la cámara de combustión. Ésto se lleva a cabo a través de dos códigos CFD que involucran dos estrategias de mallado diferentes: una basada en algoritmos de generación y refinamiento automático de la malla (AMR) a través de CONVERGE y otra técnica de mallado estático más tradicional mediante OpenFOAM.

Por un lado, se ha definido una metodología para obtener una estrategia de mallado óptima mediante el uso del AMR y se han explotado sus beneficios frente a los enfoques tradicionales de malla estática. De esta forma, se ha demostrado que la aplicabilidad de las herramientas de control de malla disponibles en CONVERGE como el refinamiento fijo (fixed embedding) y el AMR son una opción muy interesante para afrontar este tipo de problemas multiescala. Los resultados destacan una optimización del uso de los recursos computacionales y una mayor precisión en las simulaciones realizadas con la metodología presentada.

Por otro lado, el uso de herramientas CFD se ha combinado con la aplicación de técnicas de descomposición modal avanzadas (Proper Orthogonal Decomposition and Dynamic Mode Decomposition). La identificación numérica de los principales modos acústicos en la cámara de combustión ha demostrado el potencial de estas herramientas al permitir caracterizar las estructuras de flujo coherentes generadas como consecuencia de la rotura de los vórtices (VBB) y de los chorros fuertemente torbellinados presentes en el quemador LDI. Además, la implementación de estos procedimientos matemáticos ha permitido tanto recuperar información sobre las características de la dinámica de flujo como proporcionar un enfoque sistemático para identificar los principales mecanismos que sustentan las inestabilidades en la cámara de combustión. Por último, este análisis también ha permitido identificar algunas características clave en sistemas con presencia de flujo altamente torbellinado, así como revelar los patrones pulsantes, intermitentes y cíclicos relacionados con el Precessing Vortex Core (PVC).

Finalmente, la metodología validada ha sido explotada a través de un Diseño de Experimentos (DoE) para cuantificar la influencia de los factores críticos de diseño en el flujo no reactivo. De esta manera, se ha evaluado la contribución individual de algunos parámetros funcionales (el número de palas del swirler, el ángulo de dichas palas, el ancho de la cámara de combustión y la posición axial del orificio del inyector) en los patrones del campo fluido, la distribución del tamaño de gotas del combustible líquido y la aparición de inestabilidades en la cámara de combustión a través de una matriz ortogonal L9 de Taguchi. Este estudio estadístico supone un punto de partida para posteriores estudios de inyección, atomización y combustión en quemadores LDI.